

**FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO**



# **Desenvolvimento de Estratégias de Gestão Activa de Cargas para Suporte à Operação em Redes de Distribuição**

**Ana Sofia Oliveira Dionísio**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Manuel da Costa Matos

Co-orientador: Filipe Nunes Soares

29 de Julho de 2013



A Dissertação intitulada

***“Desenvolvimento de Estratégias de Gestão Activa de Cargas para Suporte  
à Operação em Redes de Distribuição”***

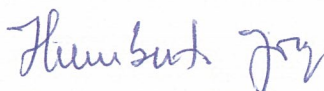
foi aprovada em provas realizadas em 25-07-2013

o júri



Presidente **Professor Doutor Carlos Coelho Leal Monteiro Moreira**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Professor Doutor Humberto Manuel Matos Jorge**

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra



**Professor Doutor Manuel António Cerqueira da Costa Matos**

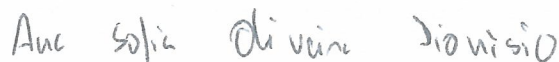
Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Doutor Filipe Nunes Soares**

Investigador do INESC - TEC

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



**Autor - Ana Sofia Oliveira Dionísio**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Este trabalho é financiado (ou parcialmente financiado) por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito dos projetos «SMAGIS – PTDC/SEN-ENR/113094/2009», «DYMONDS – CMU-PT/SIA/0043/2009».



# Resumo

Esta dissertação tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma estratégia de gestão de cargas, de modo a auxiliar a operação de uma rede de distribuição de baixa tensão.

Para isto, foi necessário criar, inicialmente, um simulador de perfis dos consumidores para se poder aplicar a estratégia desenvolvida.

No fim, é mostrada a aplicação do modelo desenvolvido a uma habitação apenas e, também, a uma rede de distribuição de baixa tensão. Para isso, foram definidos dois casos de estudo distintos.

No primeiro caso, considera-se que o comercializador de energia tem a necessidade que o consumo de potência seja o mais semelhante possível à quantidade de energia que ele comprou de modo a não sofrer penalizações.

No segundo caso, o operador da rede tem de limitar a potência consumida na rede aos limites técnicos desta, sendo necessário, então, fazer uma redução e transferência de consumo durante certos períodos.



# Abstract

The aim of this work is the development of a strategy to manage residential loads with the purpose to assist the operation of a low voltage distribution grid.

To achieve this goal, it was necessary to create a consumer profile simulator so it would be possible to apply the developed strategy.

In the end, it is shown the application of the model in a single house and, also, in a low voltage distribution grid.

To better see the application of this strategy, two different case studies were created. In the first, the electricity retailer has the necessity that the load consumption is as similar as possible to the quantity of energy he bought so that he isn't penalized.

In the second case study, the grid operator has to limit the power consumption to the technical limits of the grid, by reducing and transferring load during certain time frames.





# Agradecimentos

Queria agradecer inicialmente ao meu orientador Filipe Nunes Soares e ao investigador José Iria do INESC TEC por todo o apoio e auxílio prestado ao longo deste semestre e que foi essencial para o desenvolvimento desta dissertação.

Queria, também, agradecer ao Rodolfo Silva por todo o apoio, carinho e ajuda que me deu durante estes 6 longos anos e, também, ao Hugo Neves e Ricardo Almeida por estarem sempre presentes quando eu mais precisava.

Por fim, quero dar um forte abraço a todos os elementos da Tuna Académica de Oliveira do Douro por todos os momentos incríveis de folia, música e diversão que me proporcionaram.

Ana Dionísio



*“Qual é a única aptidão comum a todos os homens?  
É a aptidão de mudar”*

Lancelot Andrewes



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Contexto . . . . .	2
1.3	Objetivos do trabalho . . . . .	3
1.4	Estrutura da dissertação . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1	Perfis de Ocupação . . . . .	5
2.2	Caraterização das Cargas . . . . .	7
2.3	Modelização dos Equipamentos . . . . .	8
2.3.1	Iluminação . . . . .	8
2.3.2	Ar Condicionado . . . . .	8
2.3.3	Frigorífico . . . . .	9
2.3.4	Termoacumulador . . . . .	10
2.3.5	Veículo Elétrico . . . . .	11
2.4	Micro-Redes . . . . .	12
2.4.1	Arquitetura funcional . . . . .	13
2.4.2	DSM - <i>Demand Side Management</i> . . . . .	14
2.4.3	<i>Distribution System Automation</i> . . . . .	15
2.4.4	<i>Smart-Meter/EnergyBox</i> . . . . .	15
2.5	Estrutura do Mercado de Energia . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Modelização</b>	<b>19</b>
3.1	Arquitetura funcional da rede . . . . .	20
3.1.1	Estrutura . . . . .	20
3.1.2	Funcionalidades do controlo das habitações . . . . .	20
3.1.3	Funcionalidades do controlo do Posto de Transformação . . . . .	20
3.2	Geração dos perfis de consumidores . . . . .	21
3.2.1	Geração dos perfis de consumo sem otimização . . . . .	22
3.3	Flexibilidade . . . . .	30
3.3.1	Ar Condicionado . . . . .	30
3.3.2	Frigorífico . . . . .	30
3.3.3	Termoacumulador . . . . .	31
3.3.4	Veículo Elétrico . . . . .	31
3.4	Otimização . . . . .	32
3.5	Implementação em Python . . . . .	33
3.5.1	Ar Condicionado . . . . .	35
3.5.2	Frigorífico . . . . .	36

3.5.3	Termoacumulador . . . . .	37
3.5.4	Veículo Elétrico . . . . .	38
3.5.5	Resultados para uma habitação . . . . .	39
3.5.6	Implementação da flexibilidade . . . . .	41
3.5.7	Implementação da otimização . . . . .	41
3.5.8	Implementação da otimização para um cenário . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
4.1	Rede de Distribuição . . . . .	45
4.2	Caso de Estudo 1 . . . . .	47
4.3	Caso de Estudo 2 . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>59</b>
5.1	Objetivos Alcançados . . . . .	59
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	60
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>61</b>
A.1	Valores das áreas [1] . . . . .	61
A.2	Valores utilizados no AC [2] . . . . .	61
A.3	Valores utilizados no Termoacumulador . . . . .	61
A.4	Valores utilizados no Frigorífico [3] . . . . .	62
A.5	Valores utilizados no Veículo Elétrico . . . . .	62
<b>B</b>	<b>Anexos</b>	<b>63</b>
B.1	Cenários Utilizados nos Casos de Estudo . . . . .	63
<b>C</b>	<b>Anexos</b>	<b>67</b>
C.1	Perfis de consumo dos equipamentos não controláveis . . . . .	67
C.1.1	Iluminação Interior e Exterior . . . . .	67
C.1.2	Máquina de Lavar Roupa . . . . .	68
C.1.3	Máquina de Lavar Loiça . . . . .	69
C.1.4	Máquina de Secar Roupa . . . . .	69
C.1.5	Fogão . . . . .	70
C.1.6	Televisão . . . . .	70
C.1.7	Computador . . . . .	71
C.1.8	Outros . . . . .	71
C.1.9	Stand-By . . . . .	72
	<b>Referências</b>	<b>73</b>

# Lista de Figuras

2.1	Classificação das Cargas . . . . .	7
2.2	Micro-Rede . . . . .	12
2.3	Estrutura Desverticalizada . . . . .	16
3.1	Potência (kW) consumida pelo AC . . . . .	24
3.2	Temperatura (°C) influenciada pela histerese . . . . .	26
3.3	Potência (kW) influenciada pela histerese . . . . .	26
3.4	Temperatura (°C) influenciada pela histerese . . . . .	28
3.5	Potência (kW) influenciada pela histerese . . . . .	29
3.6	Fluxograma . . . . .	34
3.7	Potência consumida pelo AC em ON-Sempre . . . . .	35
3.8	Potência consumida pelo AC em "ON - Ocupada" . . . . .	36
3.9	Temperatura Frigorífico . . . . .	37
3.10	Temperatura Termoacumulador . . . . .	38
3.11	Potência consumida pelo VE . . . . .	39
3.12	Potência Total Consumida . . . . .	40
3.13	Potência Discriminada . . . . .	40
3.14	Comparação entre Potência Total e Potência Inflexível . . . . .	41
3.15	Potência Otimizada . . . . .	43
4.1	Rede distribuição em BT . . . . .	46
4.2	Potência total e discriminada por equipamento . . . . .	47
4.3	Comparação entre <i>Set-point</i> e preço . . . . .	48
4.4	Comparação entre potência não otimizada, otimizada e <i>set-point</i> . . . . .	49
4.5	Desvio da potência com otimização e o <i>set-point</i> . . . . .	49
4.6	Estado de bateria do VE . . . . .	50
4.7	AC com otimização . . . . .	51
4.8	Termoacumulador com otimização . . . . .	51
4.9	Frigorífico com otimização . . . . .	52
4.10	Preço . . . . .	53
4.11	Energia . . . . .	53
4.12	Potência com otimização e sem otimização . . . . .	54
4.13	Potência com otimização e potências discriminadas por equipamento . . . . .	55
4.14	AC com otimização . . . . .	56
4.15	Termoacumulador com otimização . . . . .	56
4.16	Frigorífico com otimização . . . . .	57
4.17	Frigorífico com otimização . . . . .	57
C.1	Iluminação Interior . . . . .	67



C.2	Iluminação Exterior . . . . .	68
C.3	Máquina Lavar Roupa . . . . .	68
C.4	Máquina Lavar Loiça . . . . .	69
C.5	Máquina Secar Roupa . . . . .	69
C.6	Fogão . . . . .	70
C.7	Televisão . . . . .	70
C.8	Computador . . . . .	71
C.9	Outros Electrodomésticos . . . . .	71
C.10	<i>Stand-By</i> . . . . .	72

# Lista de Tabelas

3.1	Ocupantes por cada tipo de habitação . . . . .	21
A.1	Áreas Utilizadas . . . . .	61
A.2	Dados AC . . . . .	61
A.3	Dados Termoacumulador . . . . .	61
A.4	Dados Frigorífico . . . . .	62
A.5	Dados VE . . . . .	62
B.1	Cenários de estudo utilizados . . . . .	63



# Abreviaturas e Símbolos

AC	Ar Condicionado
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AMI-HAN	<i>Advanced Metering Infrastructure with home-area network</i>
BT	Baixa Tensão
DSM	<i>Demand Side Management</i>
ISO	Operador do Sistema
LC	<i>Load Controller</i>
MC	<i>Microsource Controller</i>
MGCC	<i>MicroGrid Central Controller</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
VE	Veículo Elétrico



# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo irão ser expostas as principais razões que levaram à execução deste trabalho e em que contexto se insere, bem como todos os seus objetivos. Por fim, irá ser apresentada a estrutura e organização deste documento.

### 1.1 Motivação

Com a crescente mudança nos paradigmas do setor elétrico, torna-se cada vez mais importante desenvolver soluções e estratégias que possam auxiliar e melhorar as condições da prestação dos serviços elétricos.

Um dos temas mais estudados na atualidade é o desenvolvimento de estratégias de gestão ativa de cargas.

Este tipo de estratégias permite fazer uma gestão da potência consumida em cada habitação de modo a ir de encontro às necessidades do comercializador de energia ou do operador de rede sem, no entanto, prejudicar os limites de conforto definidos pelos ocupantes de cada habitação.

O comercializador de energia, baseando-se em previsões para o dia seguinte, compra no mercado de eletricidade a energia que prevê que os seus clientes irão consumir. Deste modo, é do seu interesse que o consumo de energia no dia seguinte seja o mais próximo possível da energia que ele comprou. Tendo em conta este fato, é bastante interessante o desenvolvimento de uma estratégia de gestão de cargas que consiga aproximar o consumo de potência de um determinado conjunto de clientes à energia comprada pelo comercializador.

Outra aplicação deste tipo de estratégias será no auxílio à operação da rede. O operador da rede tem, assim, um instrumento que lhe permitirá intervir no consumo de potência da rede, caso verifique que os limites técnicos desta não estão a ser cumpridos.

Consegue-se facilmente verificar que a aplicação deste tipo de estratégia de gestão contribuirá para que as redes de distribuição sejam mais eficientes, seguras e com uma maior qualidade de energia fornecida.

## 1.2 Contexto

No passado, verificava-se que o sector elétrico era um monopólio com uma estrutura verticalizada, ou seja, a empresa que produzia energia era a mesma que vendia essa mesma energia ao consumidor final, sem haver a possibilidade de escolher o fornecedor, sendo que as tarifas eram acordadas com as entidades governamentais. Para além disto não existia qualquer regulação independente.

No entanto, nos anos 70 e 80 houve uma mudança muito grande neste paradigma. Devido às crises petrolíferas que se verificaram, da desregulamentação do setor energético e da liberalização do comércio internacional surgiu a necessidade de alterar a organização do setor energético, acrescentando à estrutura vertical existente uma estrutura horizontal com novos esquemas tarifários e criação de serviços auxiliares.

Para além disto, surgiram novos agentes no sistema: entidades reguladoras, operadores de sistema e de mercado, comercializadores, etc. Um dos novos agentes que surgiu foi o operador de mercado. Este agente está responsável por estabelecer relações entre a produção, comercializadores, consumidores elegíveis, empresas de distribuição e com o operador da rede de transmissão e também de executar despachos baseados em propostas de compra/venda assegurando o relacionamento comercial entre produção e carga – Modelo em *Pool*.

Este modelo caracteriza-se por ser um mercado que compra energia para o dia seguinte de acordo com a potência que se prevê consumir. A empresa de geração faz as propostas com a quantidade de energia que tem disponível e o preço mínimo a receber e os comercializadores propõem a quantidade pretendida e o máximo preço que podem pagar por ela. O *Pool* ordena as propostas e realiza um despacho centralizado baseado nos preços. Assim, é possível que os comercializadores comprem a energia de acordo com o preço de mercado.

Por outro lado, também é possível que as empresas produtoras e os comercializadores estabeleçam contratos bilaterais. Com este tipo de contratos os agentes são livres de negociar a quantidade e preço da energia caso seja necessário compensar perdas, controlar a tensão da rede ou outros serviços auxiliares de acordo com a quantidade de potência previamente contratada. No entanto, o operador da rede tem sempre o poder para fazer alterações caso as restrições de segurança sejam violadas.

Com esta mudança de paradigma na estrutura do setor elétrico torna-se muito pertinente desenvolver estratégias de gestão ativa de cargas ao nível do consumidor, de modo a otimizar a potência consumida na rede, minimizando os desvios entre a energia comprada pelo comercializador e a energia efetivamente consumida pelos seus clientes.

No dia seguinte, se forem registados desvios entre a energia comprada pelo comercializador e a energia consumida na rede, o comercializador poderá ser penalizado.

Quando a energia comprada pelos comercializadores é maior que o consumo de energia na rede é sinal que não existe necessidade de consumo de potência na rede e, então, esse excesso de energia tem de ser vendido no mercado intra-diário. Pelo contrário, quando a energia comprada não é

suficiente para cobrir todas as necessidades de consumo de energia na rede, o comercializador terá de comprar energia extra no mercado intra-diário.

Outra importante aplicação deste tipo de estratégias poderá ser a redução da potência consumida na rede quando se verificam picos de consumo. Assim é possível fazer a sua transferência para períodos onde o consumo de energia é menor, permitindo uma melhor utilização da energia existente na rede e, também, evitando que os limites técnicos da rede sejam ultrapassados.

Com a crescente aposta nas energias renováveis verifica-se que novos problemas surgem nas redes de distribuição.

Ao introduzir-se este tipo de equipamentos na rede, poderão ocorrer grandes variações da tensão em relação ao seu valor nominal e poderão, também, ocorrer alterações no trânsito de potências nos ramos, que poderão levar a que algumas linhas fiquem congestionadas. Para além disto, são provocados problemas ao nível da qualidade e estabilidade da energia fornecida.

Para colmatar estas falhas, será necessário adotar conceitos de gestão ativa em toda a rede de distribuição, onde este tipo de produção renovável, elementos de armazenamento e cargas terão de ser utilizados em conjunto e de forma coordenada de modo a melhorar significativamente as condições de operação do sistema.

A introdução destas energias renováveis aliadas a uma gestão ativa da rede permitirá a redução da energia produzida nas centrais convencionais, dos congestionamentos na rede e diminuição das perdas, evitando novos investimentos nas redes.

Ao nível da carga, e com a introdução de melhores infraestruturas de comunicação, será possível fazer este tipo de gestão através da utilização da carga existente em cada casa para consumir os excessos de produção de energia renovável que poderão ocorrer em certos períodos ou para reduzir o consumo quando se verifica que os limites técnicos não irão ser cumpridos tendo sempre em conta as zonas de conforto definidas pelos consumidores.

Deste modo, a aplicação deste tipo de estratégias para reduzir a potência consumida quando existem picos de consumo e fazendo a sua transferência para períodos de vazio, permite tirar um melhor partido das energias renováveis existentes na rede, proporcionando uma melhor utilização da energia existente e, também, evitando que os limites técnicos da rede sejam ultrapassados.

## 1.3 Objetivos do trabalho

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma estratégia de gestão ativa de cargas para aplicação a uma rede de distribuição, de modo a que se possa fazer uma otimização da potência consumida em cada habitação de acordo com um *set-point* enviado pelo operador da rede.

Esta estratégia possibilita o cálculo para cada minuto das potências de cada equipamento numa habitação. Para além disto, calcula, também, qual irá ser a potência consumida no instante seguinte e qual a flexibilidade de cada cliente para reduzir/aumentar carga. A flexibilidade é definida tendo em consideração as preferências de cada cliente.



Por fim, tem a capacidade de otimizar as potências consumidas de cada equipamento, tanto para uma curva de *set-point* enviada por um comercializador de energia, como para um set-point fixo, enviado pelo operador da rede em caso de problemas técnicos na rede.

De modo a testar o desempenho desta estratégia de forma efetiva, foi desenvolvido um simulador de perfis de consumo para caracterizar os diversos tipos de habitação.

A estratégia desenvolvida foi implementada numa rede de teste de baixa tensão, utilizando-se o simulador de perfis de consumo para gerar diagramas de carga de cada habitação e determinar a respetiva flexibilidade para reduzir/aumentar o seu consumo.

De seguida, foram definidos dois casos de estudo. No primeiro, a potência consumida em cada habitação tem de ser gerida de modo a seguir uma curva de *set-point* enviados por um comercializador. No segundo, a estratégia de gestão ativa de carga é utilizada para evitar que o consumo total da rede ultrapasse o limite máximo do transformar do posto de transformação média tensão/baixa tensão.

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos.

O capítulo 1 contém uma breve introdução ao trabalho realizado, incluindo-se a motivação e o contexto em que esta dissertação se insere. São apresentados, também, os objetivos do trabalho e a sua estrutura.

No capítulo 2 será apresentado o levantamento de toda a informação necessária para a elaboração desta dissertação. Será exposta informação sobre micro redes e sua estrutura de comunicação, serão apresentadas técnicas já existentes de gestão ativa de cargas e os modelos clássicos utilizados para o cálculo das cargas existentes numa habitação.

No capítulo 3 é apresentada a estrutura de comunicação da rede, o simulador de perfis de consumo, a metodologia de cálculo das potências e, também, a técnica de otimização escolhida. Por fim, é explicado como foi feita a implementação das estratégias de gestão ativa de cargas para efeitos de simulação.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com o modelo desenvolvido no capítulo anterior. Para além disto, são explicados os casos de estudo onde os modelos desenvolvidos foram aplicados e os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5, serão apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como os trabalhos futuros a desenvolver nesta área.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

Neste capítulo é apresentada toda a pesquisa efetuada para a elaboração desta dissertação.

Assim, tendo em vista a criação de um simulador de perfis de ocupação, foi necessário adquirir toda a informação existente relativa aos perfis de ocupação, nomeadamente: número de ocupantes, tipos de habitações e padrões de ocupação mais comuns, e cargas existentes nas habitações. Para além disso, foi necessário adquirir os modelos que traduzem o funcionamento dessas cargas.

De seguida, faz-se a transição entre o que acontece numa habitação para o esquema geral da rede.

Para se simular o funcionamento da rede e de todas as comunicações existentes, foi necessário adquirir dados relativos às micro-redes e às suas arquiteturas de funcionamento. Deste modo, é apresentada, então, a estrutura das micro redes e a arquitetura funcional dos sistemas de controlo e comunicação, dando especial ênfase às funções de controlo da potência consumida na rede pelo operador de rede. O operador da rede, tem, então, capacidade para gerir e controlar a potência consumida na rede de acordo com as suas necessidades.

Por fim, de modo a adquirir conhecimentos sobre os mercados energéticos, foi necessário fazer uma pesquisa profunda sobre essa temática, tendo sempre em vista as funções que o comercializador da rede poderá desempenhar. Assim, e aliando-se à estrutura da micro rede apresentada, é possível extrapolar para o comercializador, as funções de controlo e gestão da rede de modo a que o consumo de potência na rede vá de encontro às necessidades deste agente.

### 2.1 Perfis de Ocupação

Para se determinar os perfis de ocupação a serem analisados recorreu-se a um estudo desenvolvido em Inglaterra [4], que teve como objetivo prever o consumo doméstico diário numa habitação de forma a se poder planear a integração de energias renováveis na rede.

No estudo são utilizados dados relativos a estatísticas de 2000 sobre o consumo de energia elétrica por parte dos consumidores verificando-se que este consumo se dividia em 3 grandes partes: 56% era utilizada para aquecimento de divisões, 24% para aquecimento de água e os

restantes 20% para iluminação e eletrodomésticos. O padrão de uso depende de vários fatores tais como: o clima, agregado familiar, cultura, fator humano e o rendimento familiar.

Assim, o consumo de energia pode ser dividido em 2 categorias:

- Físico - Onde o consumo depende do clima, estrutura da casa, perfil de ocupação e rendimento do agregado;
- Comportamental - Onde o consumo depende do fator humano, hábitos do agregado familiar;

Assim se conclui que o consumo de energia numa habitação depende, maioritariamente, do número de ocupantes da habitação e do seu perfil de ocupação.

Neste estudo foram definidos 5 perfis de ocupação:

- Perfil 1 - Habitação desocupada entre as 9h00 e as 13h30 onde um dos ocupantes poderá ter um emprego em part-time da parte da manhã;
- Perfil 2 - Habitação desocupada entre as 9h00 e as 18h00 onde todos os ocupantes têm um emprego em full-time;
- Perfil 3 - Habitação desocupada entre as 9h00 e as 16h00 sendo que a família tem uma criança em idade escolar;
- Perfil 4 - Habitação sempre ocupada. A família poderá ter uma criança recém nascida ou então poderá conter pessoas reformadas;
- Perfil 5 - Habitação desocupada entre as 13h00 e as 18h00 onde um dos ocupantes terá um emprego em part-time da parte da tarde;

Em relação aos equipamentos existentes numa habitação, foi definida a seguinte classificação [4] [5]:

- Equipamentos eletrónicos : Televisão, leitor de vídeo, leitor de DVD;
- Equipamentos de refrigeração : Frigorífico e arca congeladora;
- Equipamentos de cozinha : Fogão elétrico, micro-ondas, forno;
- Equipamentos de lavagem : Máquinas de lavar roupa e loiça e máquina de secar roupa;
- Outros equipamentos : Computador, aspirador, ferro de engomar;

Neste estudo também é possível obter as relações entre os perfis de ocupação, número de pessoas do agregado familiar e o consumo dos equipamentos elétricos. Assim, sabe-se que os equipamentos de cozinha dependem principalmente do número de ocupantes da habitação, que os equipamentos de refrigeração não têm uma dependência definida, que os equipamentos eletrónicos e outros equipamentos que existam na habitação dependem do agregado familiar e do perfil de ocupação. Também é possível saber, neste estudo, que os equipamentos de lavagem dependem do agregado familiar, e que a iluminação depende, principalmente, da estação do ano para além de depender do agregado, do número de divisões da habitação, da hora do dia e do perfil de ocupação.

Em relação ao aquecimento de água o estudo conclui que o consumo de energia depende da temperatura de água desejada, volume de água utilizado por cada pessoa e o tamanho da habitação.

## 2.2 Caraterização das Cargas

Após se analisar os perfis de ocupação das habitações é necessário identificar as cargas existentes em cada habitação.

Assim, dentro das habitações é possível fazer a divisão das cargas em dois grandes grupos: Controláveis e Não Controláveis.

Nas cargas não controláveis, inserem-se os electrodomésticos da cozinha (fogão, forno), equipamentos de entretenimento (televisão, computadores, box da tv cabo) e outros equipamentos electrónicos.

As cargas controláveis podem-se dividir em cargas térmicas e não térmicas. Nas cargas térmicas insere-se o ar condicionado, termoacumulador e frigorífico. Nas cargas não térmicas insere-se o veículo eléctrico, máquinas de lavar roupa e loiça e máquina de secar roupa.

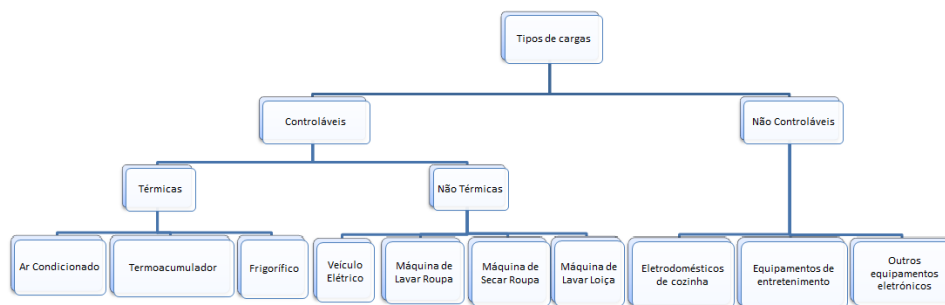


Figura 2.1: Classificação das Cargas

Dentro dos equipamentos apresentados existem alguns equipamentos domésticos que poderão ter a capacidade para transferência e/ou redução de consumo. Em habitações pode-se considerar as máquinas de lavar como potencialmente transferíveis.

Para além destes, o estudo efetuado por M. Stadler et al. [6] foca-se principalmente na capacidade de transferência de carga de equipamentos que têm como objetivo manter a temperatura dentro de limites previamente definidos, tais como, termoacumuladores, frigoríficos e ar-condicionados.

Estes equipamentos caracterizam-se por o seu potencial de transferência de carga ser possibilitado por um sistema de armazenamento térmico, ou seja, possibilitam o armazenamento de energia elétrica depois de ser convertida para energia térmica.

Para além destes equipamentos, o carro elétrico também é uma excelente aposta para este tipo de controlo de cargas devido à sua grande flexibilidade, tanto de consumo de energia, como, potencialmente, de fornecimento de energia à rede em períodos de grande consumo.

No entanto, para se poder realizar este tipo de gestão, é necessário ter uma infraestrutura de comunicações desenvolvida, do tipo *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Deste modo, surgiu o conceito de *Advanced Metering Infrastructure with home-area network* (AMI-HAN) [7] onde,

nesta rede dentro de casa, todos os equipamentos estão conetados entre eles permitindo fazer a sua gestão de forma integrada.

## 2.3 Modelização dos Equipamentos

Após a identificação das cargas existentes em cada habitação é necessário, então, definir os modelos matemáticos que caracterizam essas cargas.

Como já foi dito, existem vários equipamentos com capacidade de redução e/ou transferência de carga tais como as cargas térmicas existentes nas habitações que são responsáveis pela maior parcela de consumo de potência.

### 2.3.1 Iluminação

No artigo realizado por A. M. Ihbal et al. [5], os autores fazem algumas considerações sobre a iluminação nas habitações.

Os autores referem que a iluminação depende apenas do padrão de ocupação e estação do ano e que o consumo pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$E_l = N_b E_{rb} \quad (2.1)$$

Onde,

$E_l$  - Consumo de energia pela iluminação

$N_b$  - Numero de lampadas na habitação

$E_{rb}$  - Consumo de cada lâmpada

### 2.3.2 Ar Condicionado

Na maior parte dos casos, um AC está equipado com um regulador de temperatura clássico que faz com que a temperatura dentro da habitação se mantenha constante ao longo do tempo. Quando a temperatura desce abaixo dessa temperatura o motor do AC é ligado na potência máxima até a temperatura definida ser atingida desligando de seguida. Este tipo de controlo consegue manter os níveis de conforto mas provoca excessos de consumo dentro da habitação [8].

Para evitar estes excessos é necessário usar um tipo de controlo diferente. Este controlo pode ser feito utilizando uma banda de temperatura em vez de se definir uma temperatura fixa.

Deste modo, é possível modelizar a variação da temperatura na habitação do AC através da seguinte expressão [9] [10]:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\frac{1}{CR} [\theta(t) - \theta_a + RP + w(t)] \quad (2.2)$$

Onde,

$\theta(t)$  - Temperatura da divisão ( $^{\circ}\text{C}$ );

$C$  - Capacidade térmica ( $\text{kWh}/^{\circ}\text{C}$ );

$R$  - Resistência térmica ( $^{\circ}\text{C}/\text{kWh}$ );

$\theta_a$  - Temperatura ambiente assumindo-se constante ( $^{\circ}\text{C}$ );

$P$  - Potência térmica do AC ( $\text{kW}$ );

$w(t)$  - Representa as perdas térmicas com a abertura de portas e janelas e variação de pessoas;

No artigo citado, o autor também modeliza uma ação de controlo sobre o ar condicionado utilizando a seguinte função por ramos:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\frac{1}{CR} [\theta(t) - \theta_a + m(t)RP + w(t)] \quad (2.3)$$

$$m(t^+) = \begin{cases} 0 & \text{se } \theta(t) \leq \theta_- + u(t) \\ 1 & \text{se } \theta(t) \geq \theta_- + u(t) \\ m(t) & \text{outros,} \end{cases}$$

Onde o  $u(t)$  representa o *setpoint* de temperatura que pode ser manipulado ao longo do tempo e o  $m(t)$  representa o estado do ar condicionado (ligado ou desligado). Ao utilizar-se este set-point como um controlo externo ao AC, permite que os ocupantes das habitações possam escolher a temperatura com que se sentem mais confortáveis. Permite também que o equipamento possa ser carregado antes ou depois da redução da carga prevista ou, de modo a maximizar esta redução, este equipamento pode ser operado simetricamente à volta do intervalo de tempo, ou seja, é carregado em períodos de baixo consumo, utilizando essa energia durante o pico e volta a ser carregado posteriormente [11].

### 2.3.3 Frigorífico

Para além dos dois equipamentos já mencionados, outro que também faz parte do grupo das cargas térmicas são os equipamentos de refrigeração.

Analisando o funcionamento do frigorífico [3] pode-se verificar que a temperatura dentro do compartimento tem de se situar dentro dos limites estipulados de modo a evitar estragos nos alimentos armazenados. Assim, o compressor desliga quando a temperatura desce abaixo da temperatura limite e liga quando a temperatura é superior. Tendo em conta a esta situação, não é razoável atrasar o tempo de início do arrefecimento pois, assim, a temperatura iria ultrapassar o limite. No entanto, uma solução seria começar mais cedo o ciclo de arrefecimento.

Para se modelizar o funcionamento do frigorífico a seguinte expressão foi utilizada por T. Bigler et al. em [3]:

$$\theta_{i+1} = \varepsilon \theta_i + (1 - \varepsilon) \left( \theta_a - \eta \frac{P}{A} \right) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = e^{\frac{-\tau A}{m_c}}$$

Onde,

$\theta_{+1i}$  - Temperatura dentro do frigorífico no instante  $i+1$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_i$  - Temperatura dentro do frigorífico no instante  $i$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_a$  - Temperatura ambiente dentro da divisão ( $^{\circ}\text{C}$ );

$A$  - Condutividade térmica ( $\text{W}/^{\circ}\text{C}$ );

$m_c$  - Massa térmica ( $\text{Wh}/^{\circ}\text{C}$ );

$\eta$  - Eficiência do processo de aquecimento;

$P$  - Potência do sistema de refrigeração ( $\text{W}$ );

$\tau$  - Período de tempo;

$\varepsilon$  - Inércia do sistema

Com este modelo, controlado por um termostato, a temperatura sobe até atingir a temperatura máxima definida, ligando, então, o sistema de arrefecimento. Este sistema mantém-se ligado até a temperatura mínima definida ser atingida, desligando então.

Um modelo bastante simples de controlo foi proposto no artigo acima referenciado [6] e assenta na lógica seguinte: O sistema de controlo recebe um sinal de ligar ou desligar o armazenamento térmico com um tempo associado que indica a duração que o frigorífico terá de estar ligado ou desligado. O controlador terá que escolher aleatoriamente o instante de início do arrefecimento dentro do intervalo recebido.

Nesse instante de tempo, o sistema mudará de estado, ou seja, ligará ou desligará conforme o estado anterior e caso esta mudança não leve a violações dos limites já definidos.

Para poder tomar estas ações, o controlador terá que estar equipado com um relógio em tempo real e ter uma infraestrutura de comunicação.

### 2.3.4 Termoacumulador

Para além dos ar condicionados, os termoacumuladores também são uns excelente candidatos para serem incorporados na gestão ativa de cargas, pois a água quente que possuem pode ser utilizada para armazenar energia, tendo sempre em conta as restrições aplicáveis.

No funcionamento do termoacumulador é necessário ter em conta dois cenários. No primeiro cenário considera-se que a temperatura desce abaixo do limite definido devido a perdas térmicas e o termoacumulador estará ligado durante um curto espaço de tempo que pode ser calculado.

No segundo cenário considera-se que há uma enorme quantidade de água retirada para banhos e substituída por água fria e o período de tempo em que o termoacumulador estará ligado irá depender da quantidade de água retirada [12].

Assim, é utilizado a seguinte expressão para modelizar o funcionamento do termoacumulador [13]:

$$C \frac{d\theta}{dt} = -\alpha [\theta(t) - \theta_a] - v(t) [\theta_d - \theta_i] + m(t)P(t) \quad (2.5)$$

Onde,

- C - Capacidade térmica (kJ/°C)
- $\alpha$  - Constante perdas térmicas;
- $\theta(t)$  - Temperatura da água dentro do termoacumulador (°C)
- $\theta_a$  - Temperatura ambiente da divisão (°C);
- $v(t)$  - Caudal, representa a quantidade de água quente consumida;
- $\theta_d$  - Temperatura de água desejada (°C);
- $\theta_i$  - Temperatura de água inicial dentro do tanque (°C);
- P - Potência do sistema de aquecimento de água (kW);

Para além deste modelo, no artigo acima referenciado, também é proposta uma técnica para se determinar a disponibilidade que um equipamento tem para fornecer serviços de reserva, ou seja, aumentar ou diminuir o consumo de energia caso assim seja solicitado pelo operador da rede.

### 2.3.5 Veículo Elétrico

O veículo elétrico é um equipamento que, atualmente, tem sido profundamente estudado não só ao nível do carro em si, mas também ao nível da sua integração na rede elétrica.

Assim o veículo elétrico, como uma carga ligada à rede, pode ser considerado de duas formas.

Na primeira, o carro é uma carga simples, ou seja, não existe qualquer tipo de controlo sobre o processo de carregamento da bateria, sendo que este processo é chamado de *dumb charging*. Neste caso, o veículo elétrico começa a ser carregado mal o carro é ligado à rede e apenas termina quando a bateria atingir os 100% ou quando o dono do carro desliga a tomada. Este caso pode trazer grandes problemas para a rede pois o carregamento pode iniciar num período de pico, o que poderá trazer enormes congestionamentos, quedas de tensão e problemas de segurança, qualidade e estabilidade à rede provocando enormes prejuízos que podem, até, ser superiores aos benefícios que a compra do veículo elétrico traz.

No entanto, na segunda forma, se o carro for tratado como uma carga controlável, os problemas acima descritos podem ser colmatados. Neste caso, existe uma infraestrutura de gestão que permite o controlo do carregamento do carro de modo a que as restrições da rede não sejam ultrapassadas, ou até, regular a taxa de carregamento em função dos preços de mercado, de forma a reduzir o custo da energia consumida.

Com este tipo de controlo pode-se adotar estratégias de (Demand Side Management) DSM aliando-se o VE às cargas térmicas e aos sistemas de refrigeração. Ao adotar-se este tipo de estratégia já é possível integrar os veículos elétricos na rede, utilizando-os para preencher os períodos de vazio ou os períodos onde ocorre uma maior produção de energia proveniente do vento.



## 2.4 Micro-Redes

Com a crescente integração de unidades de produção dispersa nas redes de distribuição, é cada vez mais importante o desenvolvimento de novas estratégias de controlo e novas estruturas para as redes eléctricas.

Um dos conceitos mais estudados nos últimos anos é o conceito de micro-rede. Assim, no artigo publicado por J.A. Peças Lopes et al [14] uma micro-rede caracteriza-se por ser uma pequena rede de distribuição, onde se inclui cargas, unidades de micro geração, dispositivos de armazenamento e sistemas de gestão e controlo, suportados por uma infra-estrutura de comunicação.

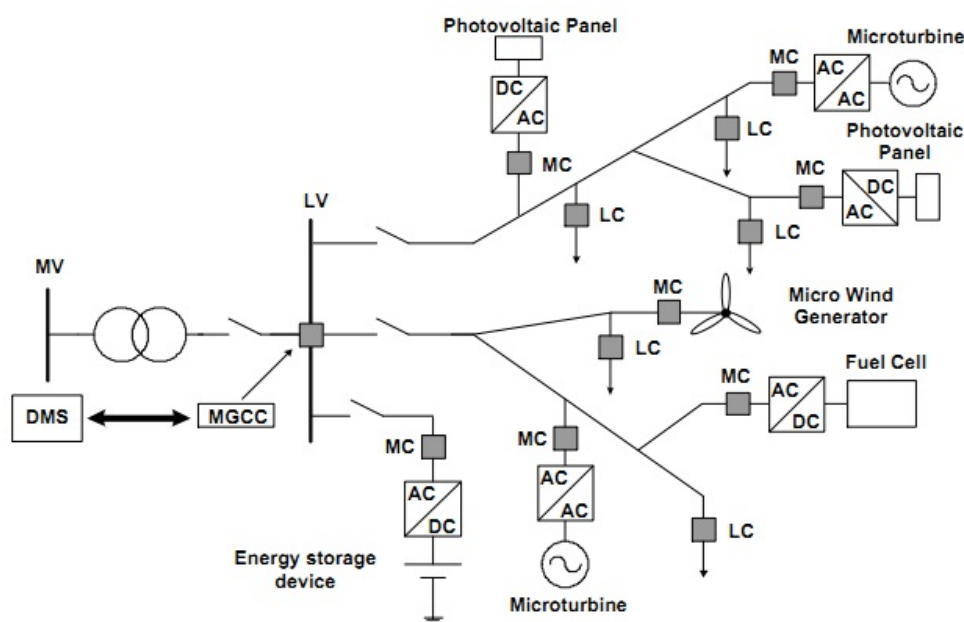


Figura 2.2: Micro-Rede

A imagem acima, retirada do artigo realizado por J.A. Peças Lopes e C.L. Moreira [15] mostra esta nova estrutura de rede de distribuição.

Este tipo de estrutura de rede é o ideal para se integrarem estratégias de gestão activa de cargas.

Com este tipo de estrutura surgem dois níveis de comunicação na rede. O mais hierarquicamente elevado situa-se no posto de transformação da rede. O seguinte corresponde aos controladores que se localizam nas habitações.

Como se pode verificar, surgem novos agentes de controlo na rede. Um deles, que se encontra localizado no posto de transformação que interliga a rede de baixa tensão à rede de média tensão, é o *MicroGrid Central Controller* (MGCC). Este agente é o principal responsável pela gestão da micro-rede a jusante, tendo como principal função a otimização da rede.

Assim, o MGCC tem à sua disposição informações relativas a previsão de carga, tanto térmica como eléctrica, e informações de previsão de produção de origem renovável e, com estas informações, determina a potência que deve ser absorvida na micro-rede, otimizando a capacidade de

produção local.

Este cenário ótimo de operação é obtido através do envio de set-points, tanto para as cargas, utilizando os *Load Controllers* (LC), como para as micro-fontes, utilizando os *Microsource Controllers* (MC).

A micro-rede terá capacidade de funcionar em dois modos. No primeiro, modo interligado normal, a rede está conetada e é servida pela rede de média tensão, podendo até injetar potência nessa rede.

O segundo modo é o funcionamento em modo de emergência onde, em caso de falha na rede de média tensão, a micro-rede tem a capacidade de operar em modo isolado, ou seja, não existe injeção de potência da rede de média tensão na micro-rede, tendo esta a capacidade de se auto sustentar.

### 2.4.1 Arquitetura funcional

A micro-rede deverá ser controlada e gerida centralmente por uma entidade (MGCC) instalada no lado de baixa tensão do posto de transformação, servindo como interface entre a micro-rede e a rede de distribuição principal, estando, portanto, no nível de controlo hierárquico mais elevado.

Num segundo nível hierárquico, cada dispositivo de micro-geração e armazenamento é controlado pelo MC e cada carga é controlada pelo LC.

Assim, de modo a ser possível assegurar uma operação perfeita do sistema, é necessário que exista comunicação entre os vários controladores existentes na rede. Os LC e MC terão de enviar ao MGCC informações sobre as cargas e produções de potência ativa e reativa na rede. Por sua vez o MGCC, terá de analisar essas informações e enviar *set-points* com informações relativas ao consumo e produção, de volta para esses controladores.

Ao mesmo tempo, é esperado que o MGCC estabeleça contato com o *Distribution Management System* (DSM), que se localiza a montante, contribuindo para uma melhoria na gestão e operação da rede de distribuição de média tensão através do estabelecimento de acordos com o operador de rede, oferecendo diversos serviços de sistema, controlo de tensão e controlo das trocas de potência ativa e reativa.

O MGCC tem, então, diferentes funções, dependendo do modo de funcionamento da micro-rede. Se a rede estiver a funcionar em modo normal de operação, a função do MGCC é receber informação das micro fontes e das cargas e automaticamente realizar estudos de previsão, avaliação da segurança da rede, agendar economicamente a produção da micro geração e realizar comunicações com o DSM.

Em modo de funcionamento de emergência, é necessário que haja uma mudança no controlo das micro-gerações. Assim, o MGCC funciona como um controlo secundário dessas micro-gerações. Também é importante que o MGCC tenha informações precisas sobre o tipo de cargas que existem na rede, caso seja necessário adotar estratégias de corte de carga, e, também, dos dispositivos de armazenamento que poderão cobrir eventuais necessidades de potência.

Para além do auxílio à operação da rede, nomeadamente a disponibilidade de uma infraestrutura de comunicações robusta, este tipo de estrutura também possibilita ao comercializador da rede fazer uma melhor gestão da energia consumida.

O comercializador adquiriu uma certa quantidade de energia de acordo com previsões de consumo de energia para o dia seguinte e é do seu interesse que o consumo na rede pelos seus clientes não sofra grande desvios dessa energia comprada, pois, caso isso aconteça, o comercializador irá ser penalizado.

Assim, o comercializador recebe as informações, enviadas pelo LC em cada habitação, sobre o consumo de potência e verifica se essa potência se desvia da quantidade de energia que ele adquiriu. Se se desviar, o comercializador envia um set-point para cada habitação, com a quantidade de potência que terá de ser reduzida ou aumentada.

Com esta nova estrutura de micro rede é possível que o comercializador, em tempo real, consiga fazer uma melhor gestão da potência consumida na rede, minimizando os prejuízos para si próprio, sem prejudicar, no entanto, as zonas de conforto definidas pelos consumidores.

Assume -se que quando a rede está a ser operada em modo normal (sem problemas técnicos), é o comercializador que controla os equipamentos e faz a gestão da carga.

Quando existe um problema técnico (um limite violado), o MGCC suspende as actividades do comercializador de energia e assume o controlo dos equipamentos com o objectivo de resolver o problema identificado.

### **2.4.2 DSM - Demand Side Management**

Devido à crescente necessidade de redução da fatura elétrica, aumento do controlo e de proteção das redes, a implementação de técnicas de DSM é cada vez mais uma realidade.

O DSM tem uma grande variedade de funções sendo as mais importantes a capacidade de reduzir o pico de consumo de energia elétrica e fazer uma gestão de consumos através de transferência de cargas para outros períodos do dia, permitindo a existência de um diagrama de cargas flexível [16]. Para além disto, ainda tem a capacidade de otimizar os custos com a presença de preços de energia que variam ao longo do tempo [11].

Com este tipo de controlo, o consumidor consegue utilizar os seus equipamentos de forma mais eficiente e com uma redução efetiva do consumo de energia.

Assim, para cada consumidor é necessário responder a certas questões [17], nomeadamente, em que equipamentos é que a sua potência vai ser cortada, durante quanto tempo e, também, quantas vezes é que vai ser cortada.

O operador do sistema é o principal beneficiado com estas estratégias pois consegue reduzir a necessidade energética nas horas de pico e reduz a diferença de potência entre o pico e o vazio. No entanto, é obrigado a comunicar ao consumidor todas as alterações que faz ao consumo de potência e também de planear uma nova estratégia de modo a que as zonas de conforto definidas pelo consumidor não sejam prejudicadas [18].

### 2.4.3 *Distribution System Automation*

Como é exemplificado na tese de J. Krishnappa [18] este tipo de automatização pode ser aplicado na forma de um sistema de comunicação que controla as cargas do consumidor e reduz o consumo de pico por uma gestão automática das cargas. Para além disto, ainda pode ser aplicada em subestações através da instalação de um microprocessador que faz a uma monitorização contínua, tomando decisões de operação, enviando comandos e relatórios de mudanças no sistema e, também, poderá guardar informação para usos futuros.

As funções de *distribution automation* podem ser divididas em 3 categorias:

- Gestão de cargas
- Gestão de operação do sistema
- Leitura remota do contador

Na função de gestão de cargas, este tipo de automatização tem controlo direto das cargas dos consumidores e, também, uma seleção adequada de registos do contador para servir da melhor forma o plano tarifário das cargas. Este tipo de gestão pode ser conseguido através do alerta ao consumidor da alteração do padrão da utilização de equipamentos e através de incentivos. Este tipo de automação permite ajustar e monitorizar remotamente as cargas e é, portanto, um grande auxílio para o DSM.

### 2.4.4 *Smart-Meter/EnergyBox*

O *Smart-Meter* caracteriza-se por ser um contador inteligente que mede o valor do consumo de uma habitação em tempo real. Deste modo, o operador da rede tem uma ferramenta de controlo na esfera do utilizador. Para o consumidor tem a vantagem de lhe ser posta à disposição informação detalhada do seu consumo. No entanto, as infraestruturas de comunicação entre os vários agentes ainda está muito pouco desenvolvida.

Assim, surgiu uma aplicação, *Energy Box* para operar em computador, local ou remoto, que gere o uso da energia elétrica das habitações. Esta aplicação tem a capacidade de atrasar o funcionamento de vários equipamentos elétricos que lhe estão conetados e, para além disso, utilizando um algoritmo, transferir as cargas para os períodos de vazio, reduzindo, então, a necessidade de expandir a capacidade de produção e transporte de energia.

Estas funcionalidades têm como consequência a redução da fatura energética do consumidor, pois este permite o corte de cargas pelo operador da rede nos períodos de pico [19]

## 2.5 Estrutura do Mercado de Energia

Atualmente, devido, principalmente, às crises petrolíferas que se verificaram, da desregulamentação do setor energético e da liberalização do comércio internacional surgiu a necessidade de alterar a organização do setor energético, acrescentando à estrutura verticalizada existente, monopolizada por uma única empresa, sem possibilidade de diversidade de oferta, uma estrutura

horizontal com novos esquemas tarifários e criação de serviços auxiliares. Com esta nova estrutura surgiram novos agentes no sistema: entidades reguladoras, operadores de sistema e de mercado, comercializadores, etc.

Pode-se verificar na imagem abaixo esta estrutura desverticalizada:

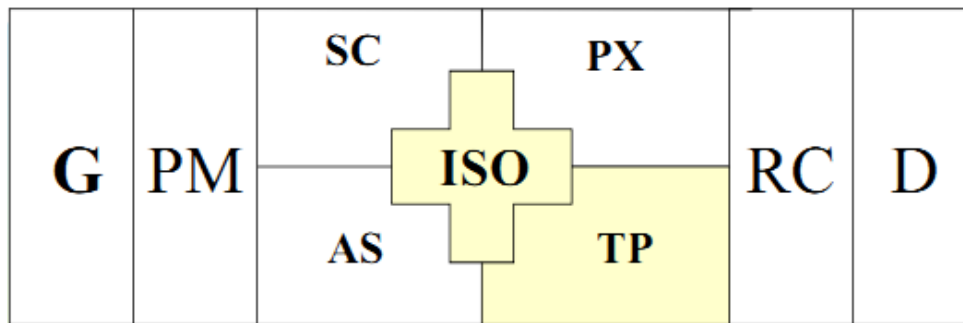


Figura 2.3: Estrutura Desverticalizada

O operador de sistema (ISO), que pode corresponder a um país ou área, tem a principal função de operar a rede de transmissão, analisar a fiabilidade da rede e fornecer serviços auxiliares. Terá de ser independente da carga.

Outro agente que surgiu foi o operador de mercado. Este agente está responsável por estabelecer relações entre a produção, comercializadores, consumidores elegíveis, empresas de distribuição e com o operador da rede de transmissão e também de executar despachos baseados em propostas de compra/venda assegurando o relacionamento comercial entre produção e carga – Modelo em *Pool*. Existe interação entre operador de mercado e o operador de sistema.

O modelo em *Pool* caracteriza-se por ser um mercado que compra energia para o dia seguinte de acordo com a potência que se prevê consumir. A empresa de geração faz as propostas com a quantidade de energia que tem disponível e o preço mínimo a receber e os comercializadores propõem a quantidade pretendida e o máximo preço que podem pagar por ela. O *Pool* ordena as propostas e realiza um despacho centralizado baseado nos preços. Assim, é possível que os comercializadores comprem a energia de acordo com o preço de mercado.

Por outro lado, também é possível que as empresas produtoras e os comercializadores estabeleçam contratos bilaterais. Com este tipo de contratos os agentes de mercado são livres de negociar a quantidade, preço da energia caso seja necessário compensar perdas, controlar a tensão da rede ou outros serviços auxiliares de acordo com a quantidade de potência previamente contratada. A oferta e a procura procuram sempre as melhores propostas, sendo que a carga tem sempre o direito de escolha.

No dia seguinte, o comercializador poderá ser penalizado se forem registados desvios entre a energia comprada por este e a energia consumida na rede.

Quando a energia comprada pelos comercializadores é maior que o consumo de energia na rede é sinal que não existe necessidade de consumo de potência na rede e, então, esse excesso de energia tem de ser vendido no mercado intra-diário. Pelo contrário, quando a energia comprada não é

suficiente para cobrir todas as necessidades de consumo de energia na rede, o comercializador terá de comprar energia extra no mercado intra-diário.

Neste tipo de contratos, há uma grande necessidade de coordenação entre o ISO e os comercializadores de modo a evitar congestionamentos e garantir a segurança de exploração. No entanto, o operador da rede tem sempre o poder para fazer alterações caso as restrições de segurança sejam violadas.

Na maior parte dos países os contratos bilaterais e o modelo em *Pool* co-existem na mesma estrutura - Estrutura mista.



## Capítulo 3

# Modelização

Neste capítulo é apresentada toda a metodologia desenvolvida para a criação da estratégia de gestão ativa de cargas, tendo sempre em vista a otimização da potência consumida na rede.

Deste modo, inicialmente, é apresentada a arquitetura de comunicação e controlo da rede. A existência de uma estrutura de controlo eficaz é essencial para que a troca de informações entre o operador de rede/comercializador e a rede seja feita o mais rapidamente possível para que os agentes possam intervir nessa rede.

De seguida, é apresentada a metodologia de criação do simulador de perfis de consumo e, também, são apresentados os modelos finais utilizados para calcular as potências consumidas pelo ar condicionado, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico. Para além disso, é apresentado, também, o método de cálculo das flexibilidades máximas e mínimas de cada um dos equipamentos acima descritos. Visto que as flexibilidades máximas e mínimas se caracterizam por ser o consumo máximo e mínimo que os aparelhos são capazes de passar a consumir, tendo sempre em conta as zonas de conforto definidas pelos ocupantes das habitações, é essencial fazer este cálculo para poder ser utilizado no modelo de otimização.

Por fim, e tendo em vista que o principal objetivo desta dissertação é criar uma estratégia de gestão de cargas, é, então, apresentado o modelo de otimização utilizado para ir de encontro a este objetivo definido.

O modelo de otimização assenta no pressuposto que existe troca de informação entre o operador de rede/comercializador e as habitações e, tendo em conta as flexibilidades calculadas e a previsão do consumo de potência, o agente é capaz de fazer a redução/aumento de carga de acordo com as suas necessidades, sem prejudicar, no entanto, as zonas de conforto definidas pelos ocupantes das habitações.

No final é explicado como foi feita a implementação dos modelos em *Python* e resultados para uma habitação apenas.



## 3.1 Arquitetura funcional da rede

### 3.1.1 Estrutura

Para se poder implementar este tipo de estratégias é necessário que a rede onde esta se irá aplicar tenha uma infraestrutura de comunicação e controlo hierárquico muito desenvolvida, tal como foi explicado no capítulo anterior.

Definiu-se, então, que entre o instante  $i$  e o instante  $i+1$ , ocorrem as comunicações entre os vários controladores existentes na rede.

Assim, definiu-se dois níveis hierárquicos de comunicação. O primeiro, situado ao nível do posto de transformação, terá como funções receber as informações enviadas pelo controlador instalado em cada habitação. Após analisar essa informação recebida, e caso decida que não é necessário fazer alterações, não é enviado nada de volta para as habitações. Caso seja necessário fazer alterações ao consumo de potência, o MGCC e/ou o comercializador de rede poderá enviar set-points de volta com a potência que cada habitação terá de consumir.

Ao nível das habitações, o controlador aí instalado terá que enviar ao controlador do posto de transformação, para cada instante, as potências flexíveis e inflexíveis consumidas nesse instante, a previsão de potência consumida para o instante imediatamente a seguir e as potências máximas e mínimas que cada equipamento dentro de casa tem a capacidade de consumir, também, para o instante imediatamente a seguir.

Os equipamentos flexíveis caracterizam-se por terem a capacidade de poderem ser controlados, podendo assumir uma determinada gama de valores da potência. Temos como exemplo de equipamentos flexíveis o ar condicionado e o veículo elétrico.

Os equipamentos inflexíveis tem a característica de não poderem ser controlados. O frigorífico e o termoacumulador são dois exemplos deste tipo de equipamentos.

### 3.1.2 Funcionalidades do controlo das habitações

A principal aplicação do controlador instalado nas habitações, normalmente um contador inteligente, é ter a capacidade de atrasar o funcionamento de alguns equipamentos elétricos, nomeadamente do ar condicionado, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico, o que leva a que haja uma redução de consumo nos períodos de pico, transferindo esse consumo para preencher os períodos de vazio. Para ser possível fazer este controlo, o controlador tem de ter sempre em conta a flexibilidade estabelecida pelo consumidor.

Para além disto, o contador também disponibiliza o preço de mercado da energia elétrica e temperatura exterior. Assim, é necessário existir comunicação dentro da habitação entre os vários equipamentos e sensores, com o contador.

### 3.1.3 Funcionalidades do controlo do Posto de Transformação

Neste trabalho apenas se considera as comunicações existentes entre o MGCC e os LC, sendo que a principal funcionalidade do MGCC será a comunicação com os controladores locais (LC)

enviando informação sobre redução de cargas.

Assim o MGCC é o principal responsável pela gestão técnica da rede de distribuição pela qual está responsável. Ao receber as informações enviadas pelos controladores localizados nas habitações, o MGCC terá de tomar uma decisão. Caso considere que a potência que se prevê consumir para o instante seguinte não ultrapassa nenhum limite técnico da rede, não envia nada de volta para os LC.

Caso considere que a potência irá ultrapassar os limites impostos, e analisando as flexibilidades máximas e mínimas de cada um dos quatro equipamentos acima descritos, o MGCC corre um modelo de otimização de modo a que a potência consumida não ultrapasse os limites.

Também se considera que entre o instante  $i$  e o instante  $i+1$  ocorrem todas as trocas de informação entre os controladores, o MGCC toma a decisão e aplica o modelo de otimização.

### 3.2 Geração dos perfis de consumidores

Para se poder aplicar o modelo criado nesta dissertação foi necessário, inicialmente, definir os perfis de consumidores que iriam ser utilizados neste trabalho. Tentou-se que estes fossem o mais representativos possível sem serem exageradamente detalhados, pois seria necessário um tempo excessivo para considerar todos os cenários possíveis. Definiu-se, então, as tipologias das habitações que iriam ser utilizadas, o nº de ocupantes, o padrão de ocupação, o período de banho e que equipamentos são, ou não, elétricos.

Para este trabalho definiu-se os seguintes perfis de ocupação baseando-se nos dados retirados de um estudo realizado no Reino Unido [5] pois não existem dados referentes a Portugal:

Tabela 3.1: Ocupantes por cada tipo de habitação

Tipo de Habitação	Ocupantes
T1	1
	2
T2	2
	3
T3	3
	4
Vivenda	3
	4

Em relação ao período de ocupação, foram utilizados dois dos cinco períodos apresentados no capítulo anterior:

- Período 1 : Casa desocupada entre as 9h00 e as 18h00;

- Período 2 : Casa sempre ocupada;

Por fim, também foi necessário fazer algumas considerações para os banhos dos ocupantes. Assim, foi definido que cada habitação só pode ter, no máximo, dois banhos sendo que podem ser ou no período da manhã ou no período da noite.

Para o estudo da iluminação foi necessário fazer a sua divisão em Iluminação Externa e Iluminação Interna. Na Iluminação externa foi definido que apenas existiria nas habitações do tipo Vivenda e que estaria ligada quando não houvesse luz natural (para um dia de Inverno, entre as 18h30 e as 7h00).

Para a Iluminação Interna foi definido que esta estaria ligada apenas quando não houvesse luz natural e a casa estivesse ocupada.

Para o caso dos equipamentos elétricos, foi necessário saber os que existem numa habitação e se o seu funcionamento depende ou não de eletricidade. Assim, foram considerados os seguintes equipamentos:

- Ar Condicionado;
- Termoacumulador;
- Frigorífico;
- Veículo Elétrico;
- Máquinas de lavar roupa e loiça;
- Máquina de secar roupa;
- Fogão/forno;
- Televisão + Box da televisão por cabo;
- Computadores;
- Outros (ferro, microondas);
- Aparelhagem em StandBy;

Considerou-se também que o ar condicionado, termoacumulador, máquinas e fogão podem ou não funcionar a eletricidade e que pode ou não existir veículo elétrico na habitação. O ar condicionado pode, também, funcionar de duas maneiras: uma onde está sempre ligado e outra, onde apenas está ligado durante o período de ocupação da habitação.

Obtém-se, então, 2591 cenários possíveis de serem utilizados para estudar a rede.

### **3.2.1 Geração dos perfis de consumo sem otimização**

Nesta secção serão descritos os modelos que foram utilizados e a metodologia adotada para o cálculo das potências consumidas do ar condicionado, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico.

Para este trabalho, apenas foram programados modelos para o ar condicionado, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico sendo que os restantes dados foram obtidos no Projecto SMAGIS

- Configuração de um Sistema de Rede de Distribuição Inteligente de um Sistema de Armazenamento de Energia na presença de microgeração com energias renováveis, veículos eléctricos e Poligeração [20].

### 3.2.1.1 Ar Condicionado

Para se fazer o cálculo do aquecimento foi utilizado o seguinte método recursivo onde se calcula o valor do instante  $i+1$  utilizando o valor do instante  $i$ . Este modelo baseia-se no modelo 2.3 já apresentado no capítulo 2 secção 2.3.2 apresentando, no entanto, algumas modificações:

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{\Delta t}{CR} (\theta_i - \theta_a - RP_i) \quad (3.1)$$

Onde,

$i$  - instante temporal

$\theta_{i+1}$  (°C) - Temperatura no instante  $i+1$ ;

$\theta_i$  (°C) - Temperatura no instante  $i$ ;

$\theta_a$  (°C) - Temperatura exterior à habitação, variando ao longo do tempo;

$C$  (kWh/°C) - Capacidade térmica;

$R$  (°C/kWh) - Resistência térmica;

$P_i$  (kW) - Potência necessária para o aquecimento da habitação ;

$\Delta t$  (hora) - Intervalo de tempo;

Caso seja necessário fazer um aquecimento da habitação, por a temperatura ser inferior ao limite desejado, a expressão utilizada é a acima apresentada. Caso seja necessário fazer um arrefecimento, devido à temperatura estar mais elevada, a fórmula utilizada é, então, a seguinte, onde as variáveis têm o mesmo significado:

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \frac{\Delta t}{CR} (\theta_i - \theta_a + RP_i) \quad (3.2)$$

Os valores de  $C$  e  $R$  são gerados através de uma função densidade probabilidade linear tendo como valores máximos e mínimos os limites técnicos da habitação que podem ser consultados na tabela A.2 do anexo A, variando, portanto, os seus valores para cada cenário. Este fato possibilita ter habitações com características diferentes.

O valor de  $\theta_a$  corresponde à temperatura exterior à casa, sendo que para este estudo foram adotadas temperaturas de inverno. Uma alteração feita, em relação ao modelo apresentado em 2.3, foi a consideração que a parcela  $w(t)$  pode ser desprezada devido ao fato de o seu valor ter um peso bastante pequeno no valor da temperatura.

Este modelo apresenta o funcionamento de um ar condicionado tradicional. No entanto, estão a surgir, atualmente, no mercado, ar condicionados mais eficientes energeticamente do que este tradicional. Um desses exemplos é o *inverter* AC.

Este tipo de ar condicionado tem a característica de ser mais eficiente energeticamente e de se poder controlar a temperatura com mais precisão. Deste modo, este tipo de ar condicionado é uma melhor alternativa que os ar condicionados atuais.

Assim, a fórmula em 3.1 foi alterada de modo a calcular-se a potência necessária para manter a temperatura estável e com um valor já definido, ficando então com o seguinte aspeto:

$$P_i = \frac{\theta_i - \theta_a}{R} - \frac{\theta_i - \theta_d}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Onde as variáveis têm o mesmo significado que na equação anterior e o valor  $\theta_d$  corresponde à temperatura desejada na casa.

Ao calcular-se a potência necessária para manter a temperatura estável, evita-se que o ar condicionado esteja sempre a variar entre ON e OFF, obtendo-se então um perfil de potência dividido por níveis, como se pode observar no gráfico seguinte:

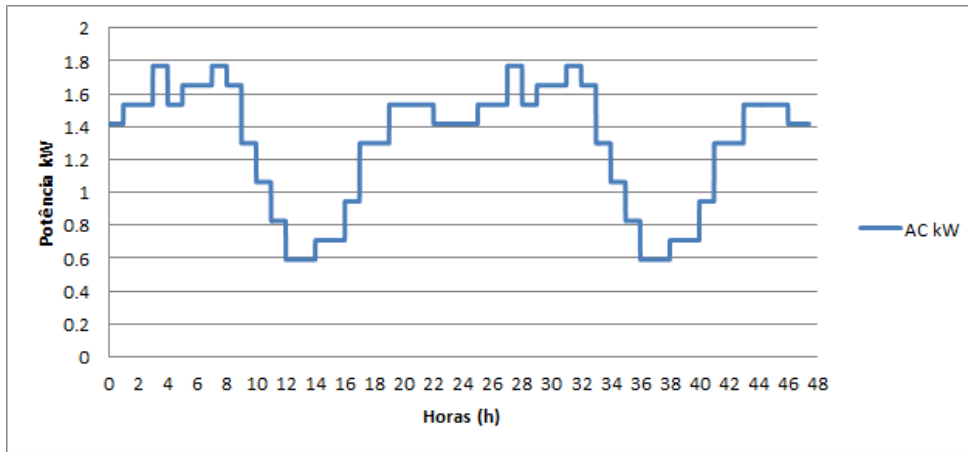


Figura 3.1: Potência (kW) consumida pelo AC

Neste gráfico está exemplificado a simulação do funcionamento do *inverter* AC para um período de dois dias em modo de operação regular.

### 3.2.1.2 Frigorífico

Para além do ar condicionado foi também necessário modelizar o frigorífico pois considerou-se que todas as casas têm um. Tal como foi feito para o aquecimento, é calculada a temperatura para  $i+1$  tendo por base o valor da temperatura para  $i$ . O modelo utilizado foi o seguinte e baseia-se no modelo 2.4 apresentado no capítulo 2:

$$\theta_{i+1} = \varepsilon \theta_i + (1 - \varepsilon) \left( \theta_a - \eta \frac{P}{A} \right) \quad (3.4)$$

$$P = \begin{cases} P_{max} & \text{se } \theta_i \geq 8 \text{ ou } (\theta_i \leq 8 \text{ e } \Delta\theta \geq 0) \\ 0 & \text{se } \theta_i \leq 6 \text{ ou } (\theta_i \leq 8 \text{ e } \Delta\theta < 0) \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\Delta\theta = \theta_{i-1} - \theta_i$$

Onde,

$i$  - instante temporal

$\theta_{i+1}$  (°C) - Temperatura no instante  $i+1$ ;

$\theta_i$  (°C) - Temperatura no instante  $i$ ;

$\theta_a$  (°C) - Temperatura ambiente dentro da divisão;

$A$  (W/°C) - Condutividade térmica;

$m_c$  (Wh/°C) - Massa térmica;

$\eta$  - Eficiência do processo de aquecimento;

$P_i$  (W) - Potência do sistema de refrigeração;

$\tau$  (segundos) - Período de tempo;

Os valores de  $m_c$  e  $P_i$  são gerados através de uma função densidade de probabilidade linear com os valores típicos que podem ser consultados na tabela A.4 do anexo A de modo a criar frigoríficos com características diferentes para cada habitação.

Quando se implementou este modelo, verificou-se que, tal como no aquecimento, ao ser atingida a temperatura limite, o sistema de refrigeração ligava, fazendo descer a temperatura e desligando no instante seguinte. Ao desligar a temperatura voltava a subir para valores muito elevados, entrando num ciclo.

Para resolver este problema, decidiu-se criar uma banda de histerese. Assim definiu-se que, em vez de o sistema de refrigeração desligar mal a temperatura desça, continue ligado até a temperatura atingir um limite mínimo, desligando apenas aí. A banda de histerese apenas é aplicada quando a temperatura é inferior a 8°C e superior a 6°C. Podemos observar no gráfico seguinte a aplicação da banda de histerese neste equipamento:

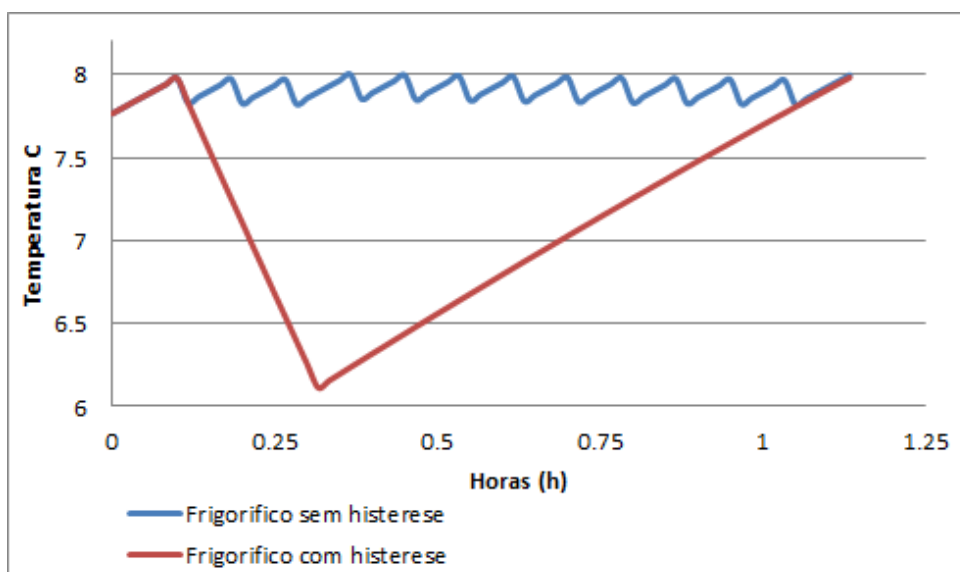


Figura 3.2: Temperatura (°C) influenciada pela histerese

Como se pode observar, no caso sem histerese, a temperatura oscilou continuamente entre 8°C e 7,9°C enquanto que no caso com histerese foi possível baixar a temperatura até 6°C subindo depois, mais lentamente, até 8°C.

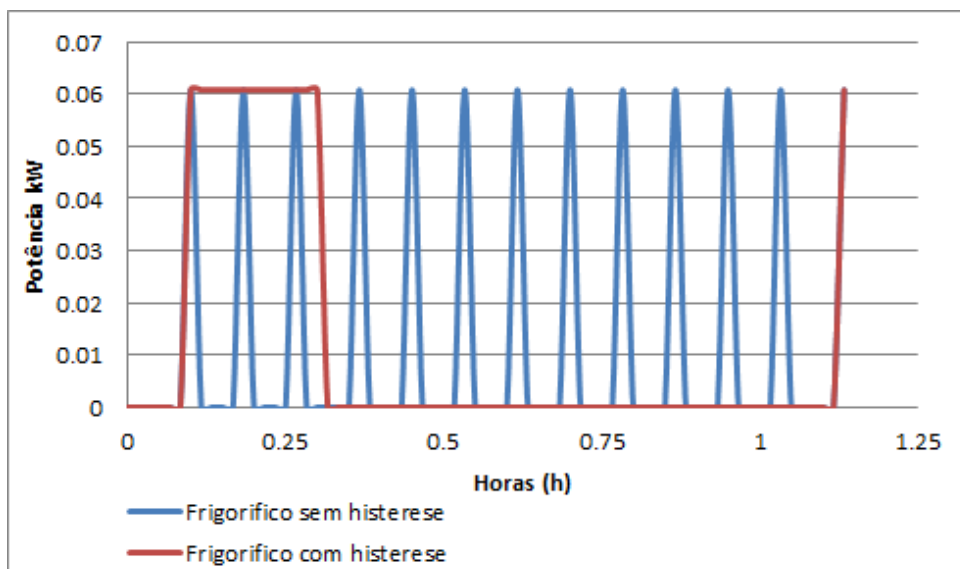


Figura 3.3: Potência (kW) influenciada pela histerese

No caso da potência, pode-se observar que sem histerese, o sistema de refrigeração liga e desliga continuamente enquanto que no caso com histerese é possível manter o sistema ligado mais tempo do que seria suposto, possibilitando, posteriormente que fique desligado durante mais tempo do que aconteceria sem histerese.

Conclui-se, portanto que a aplicação da histerese evita que existam variações bruscas de potência consumida em instantes adjacentes, passando a existir bandas, o que torna o sistema mais estável.

### 3.2.1.3 Termoacumulador

Para além do cálculo da evolução das potências do ar condicionado e do frigorífico, também foi necessário utilizar o mesmo método para o termoacumulador.

Neste trabalho considerou-se que, em média, existem duas pessoas por dia que tomam banho em cada habitação e que o tomam num de dois períodos, ou de manhã, antes de saírem de casa ou ao final da tarde depois de chegarem a casa.

Definiu-se também que cada banho teria uma duração de 15 minutos e que existiria um intervalo de 15 minutos entre cada banho.

Assim, é possível definir os períodos onde existe saída de água quente do termoacumulador, sendo possível determinar o intervalo de tempo em que o mesmo consome energia.

O modelo matemático utilizado para o cálculo da temperatura neste equipamento é o seguinte, sendo que é baseado no modelo 2.5 apresentado no capítulo 2:

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{\Delta t}{C} [-\alpha (\theta_i - \theta_a) - v_t (\theta_d - \theta_{inicial}) + P_{termo}] \quad (3.6)$$

$$P_{termo} = \begin{cases} P_{max} & se \quad \theta_i \leq 60 \text{ ou } \theta_i \leq 30 \text{ ou } (\theta_i \geq 60 \text{ e } \Delta\theta \leq 0) \\ 0 & se \quad \theta_i \geq 62 \text{ ou } (\theta_i \geq 60 \text{ e } \Delta\theta > 0) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\Delta\theta = \theta_{i-1} - \theta_i$$

Onde,

$i$  - instante temporal

$\theta_{i+1}$  (°C) - Temperatura da água no instante  $i+1$ ;

$\theta_i$  (°C) - Temperatura da água no instante  $i$ ;

$\Delta t$  (segundos) - Período de tempo

$\alpha$  - Constante perdas térmicas;

$C$  (kJ/°C) - Capacidade térmica;

$v_t$  - Caudal, representa a quantidade de água quente consumida;

$\theta_a$  (°C) - Temperatura ambiente da divisão;

$\theta_d$  (°C) - Temperatura de água desejada;

$\theta_{inicial}$  (°C) - Temperatura de água inicial dentro do tanque;

$P_{termo}$  (kW) - Potência do sistema de aquecimento de água ;

Os valores típicos podem ser consultados na tabela A.3 do anexo A.



Foram definidas, então, algumas restrições para a temperatura admitida dentro do termoacumulador, tendo em conta questões sanitárias. Assim, quando a temperatura é inferior a  $60^{\circ}\text{C}$  o sistema de aquecimento de água passa ao estado ligado mantendo, no entanto, a saída de água quente para o banho. A partir do momento em que a temperatura é inferior a  $30^{\circ}\text{C}$  a saída de água quente é cortada mantendo-se ligado o sistema de aquecimento.

Este modelo de cálculo provoca o mesmo efeito de variações bruscas de potência verificadas no frigorífico, pois a potência do termoacumulador apenas pode assumir dois valores 0 e  $P_{\text{máx}}$ . Da mesma maneira, foi criada uma banda de histerese para evitar este efeito. Assim, a potência do sistema de aquecimento continua ligada até a temperatura atingir  $62^{\circ}\text{C}$  desligando-se apenas neste momento. Pode-se verificar nos gráficos seguintes a aplicação da banda de histerese neste equipamento:

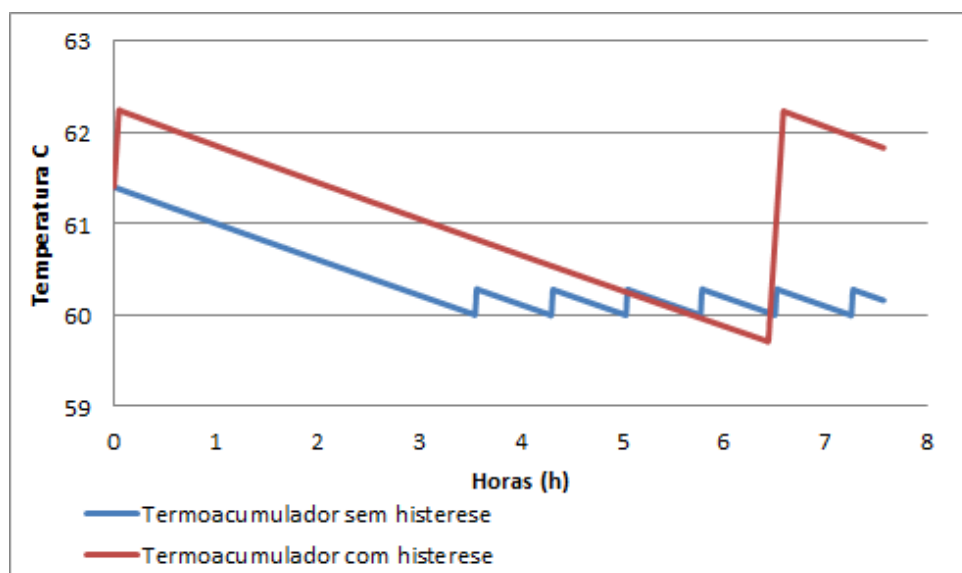


Figura 3.4: Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) influenciada pela histerese

Pode-se observar no gráfico que, no caso do sistema sem histerese, a temperatura sobe ligeiramente acima de  $60^{\circ}\text{C}$ , baixando de seguida, enquanto que no caso com histerese, a temperatura sobe até  $62^{\circ}\text{C}$  baixando lentamente. Este fato permite que a potência necessária para aquecer a água apenas seja consumida em intervalos de tempo esporádicos, ao contrário do que aconteceria se não se tivesse aplicado esta estratégia. Pode-se observar a potência consumida com e sem histerese neste equipamento no gráfico seguinte:

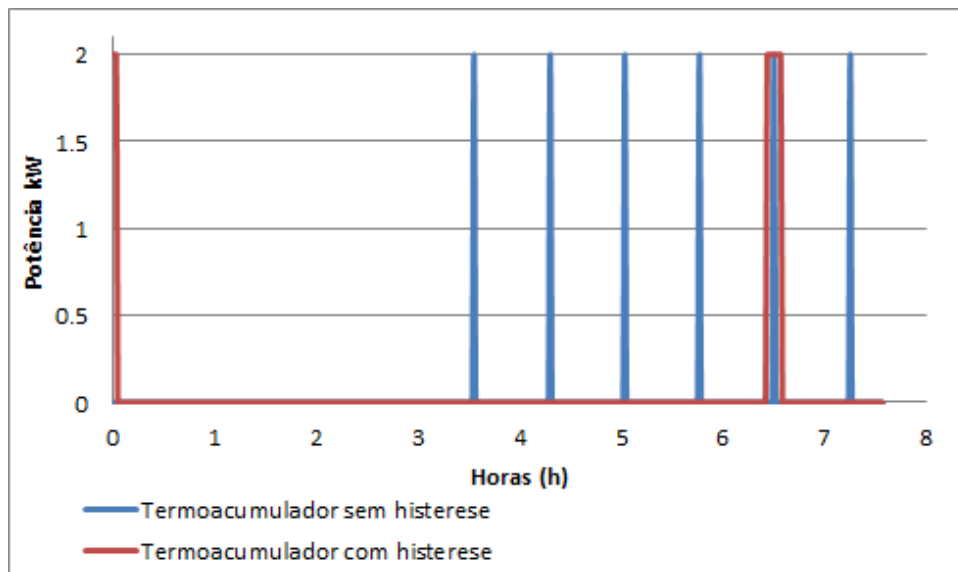


Figura 3.5: Potência (kW) influenciada pela histerese

#### 3.2.1.4 Veículo Elétrico

Por fim, foi necessário escolher um modelo para o veículo elétrico. Neste modelo é calculado o estado de carregamento da bateria para o instante seguinte, tendo em conta o estado atual. A expressão utilizada para o carregamento da bateria é a seguinte:

$$SOC_{i+1} = SOC_i + \frac{\eta P}{C} \Delta t \quad (3.8)$$

Onde,

$i$  - instante temporal

$P$  (kW) - Potência consumida para o carregamento do veículo;

$C$  (kW) - Capacidade máxima da bateria;

$SOC$  (%) - *State of Charge* ou estado de carregamento da bateria;

$\eta$  - Rendimento do carregamento

$\Delta t$  (segundos) - Intervalo de tempo.

Os valores típicos podem ser consultados na tabela A.5 do anexo A. Definiu-se que o carro é carregado a partir do momento a que chega a casa e que a bateria carrega até atingir 100%, sendo que o carregamento tem de ser efetuado entre o instante a que o ocupante chega a casa e a hora que sai no dia seguinte. Considerou-se também que o carro só carrega se o estado da bateria for inferior a 60%. Assim, no instante de tempo  $i$  que corresponde à hora de chegada a casa é sorteado um valor para o estado de carga da bateria, baseado numa função densidade de probabilidade linear entre 20% e 100%. Considerou-se que se o valor gerado for superior a 60% o carro não carrega. Se for inferior, o carro começa a carregar até a bateria ficar completamente carregada.

### 3.3 Flexibilidade

Sendo o principal objetivo deste trabalho desenhar uma estratégia que permita fazer uma gestão ativa de cargas através da otimização das potências consumidas fazendo uso de transferência e/ou redução de carga, é necessário, então, saber quais os consumos máximos e mínimos que é possível definir de modo a que a zona de conforto definida pelo ocupante da habitação não seja prejudicada.

Assim, considera-se que a flexibilidade máxima corresponde à potência máxima a que consegue funcionar cada equipamento caso o operador da rede assim o necessite.

Do mesmo modo, considera-se que a flexibilidade mínima corresponde à potência mínima a que cada equipamento consegue funcionar.

#### 3.3.1 Ar Condicionado

No caso do ar condicionado, considera-se que o utilizador deixa que a temperatura dentro de casa possa variar entre 17°C e 22°C, em vez de ter a temperatura fixa a 19°C.

Deste modo, utiliza-se mais uma vez a fórmula 3.3 para o calculo da potência, substituindo o  $\theta_d$  por 22 caso se queira calcular a flexibilidade máxima, ou 17 para o caso da flexibilidade mínima. As equações seguinte representam este calculo acima descrito:

$$Flexibilidade_{max_{i+1}} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_{ai+1}}{R} - \frac{\theta_{i+1} - \theta_d}{\Delta t} \quad (3.9)$$

$$Flexibilidade_{min_{i+1}} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_{ai+1}}{R} - \frac{\theta_{i+1} - \theta_d}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Em cada instante  $i$ , a flexibilidade é calculada sempre para o instante  $i+1$ , como se pode observar pelas fórmulas, utilizando os valores das temperaturas calculados para o instante  $i+1$ .

Assim, caso seja necessário diminuir o consumo de potência na habitação, o ar condicionado tem a capacidade de diminuir a sua potência consumida, devido à flexibilidade mínima, até a temperatura atingir 17°C, mantendo-se constante enquanto for necessário.

Após esse período, a potência aumenta até a temperatura atingir 19°C. Se for necessário aumentar o consumo de potência na habitação, a potência aumenta até à flexibilidade máxima, deixando a temperatura subir até aos 22°C.

Quando for possível diminuir o consumo, a potência volta a baixar e a temperatura volta a estabilizar nos 19°C.

#### 3.3.2 Frigorífico

Para se definir a flexibilidade do frigorífico é necessário ter em conta os limites máximos e mínimos da temperatura e a banda de histerese. Deste modo, no caso de a temperatura ser superior

ao limite máximo (8°C) tanto a flexibilidade máxima e mínima são 0 kW.

Se a temperatura for inferior ao limite máximo e se se encontrar na banda de histerese, a flexibilidade máxima e mínima são iguais à potência.

Caso a temperatura seja inferior e não esteja na banda de histerese a flexibilidade máxima é igual à potência e a flexibilidade mínima é 0 kW.

Por fim, considerou-se que o limite mínimo para a temperatura é 3°C. Se a temperatura for inferior a esse limite tanto a flexibilidade máxima como a mínima são iguais à potência do frigorífico.

### 3.3.3 Termoacumulador

O termoacumulador tem um modo de cálculo das flexibilidades semelhante ao do frigorífico. Assim, considera-se 70°C como o limite máximo que a temperatura pode atingir. Se a temperatura for superior a esse valor, tanto a flexibilidade máxima como a mínima serão 0 kW.

Quando a temperatura se encontra entre os 60°C e os 70°C e, também, na banda de histerese tanto a flexibilidade máxima como a mínima são iguais à potência necessária para aquecer a água dentro do termoacumulador.

Se a temperatura estiver, igualmente, entre os 60°C e os 70°C mas, pelo contrário, não se encontrar na banda de histerese, a flexibilidade máxima é igual à potência consumida e a flexibilidade mínima é 0 kW.

Quando a temperatura desce abaixo dos 60°C tanto a flexibilidade máxima como a mínima são iguais à potência consumida do termoacumulador.

### 3.3.4 Veículo Elétrico

Por fim, é necessário calcular as flexibilidades para o veículo elétrico. Assim, sempre que o estado de carga da bateria for inferior a 100% a flexibilidade máxima será igual à potência de carregamento da bateria.

Para o caso da flexibilidade mínima é necessário ter em conta que o carro não necessita de começar a carregar assim que chega a casa, apenas é necessário que na hora de saída a bateria já esteja carregada, começando o carregamento apenas quando for benéfico para a rede. A fórmula que permite este cálculo é a seguinte:

$$Flexibilidade_{min} = (1 - SOC_{i+1}) \frac{C \cdot t}{\eta} - (hora_{saida} - t_{i+2}) P \quad (3.11)$$

Onde,

$i$  - instante temporal

$P$  (kW) - Potência consumida para o carregamento do veículo;

$C$  (kW) - Capacidade máxima da bateria;

$SOC$  (%) - *State of Charge* ou estado de carregamento da bateria;

$\eta$  - Rendimento do carregamento

$\Delta t$  (segundos) - Intervalo de tempo.

$t$  (min) - Período de tempo, igual a 60 segundos

$hora_{saida}$  (min) - Hora de saída das habitações

$t_{i+2}$  (segundos) - minuto no instante  $i+2$

Assim é possível adiar o carregamento até ser benéfico para a rede ou até ao instante limite necessário para que na hora de saída a bateria esteja completamente carregada.

### 3.4 Otimização

O principal objetivo deste trabalho é implementar um modelo que permita otimizar a potência consumida em cada habitação existente na rede.

Para este trabalho foi considerado que existe comunicação entre a habitação (LC) e o operador de rede. Assim, cada habitação envia para o operador de rede a potência que está a consumir nesse instante, a potência que está previsto consumir no instante seguinte, e as flexibilidades máxima e mínimas também para o instante seguinte.

Tendo estes dados, o operador de rede verifica se a potência para o instante seguinte ultrapassa os limites técnicos da rede ou um outro limite definido. Caso ultrapasse e, utilizando um método de otimização, o operador de rede envia um *set-point* para todas as habitações com as potências que cada equipamento terá de consumir de modo a que os limites não sejam ultrapassados. É de salientar que o modelo de otimização é corrido para cada instante separadamente.

Assim, o modelo que o operador de rede utiliza para otimizar o consumo na rede é o seguinte:

$$\text{minimizar} \left| set\ point_i - P_{inf\ total_i} - \sum_{j=0}^n (P_{AC_{i,j}} + P_{VE_{i,j}} + P_{termo_{i,j}} + P_{frigi_{i,j}}) \right| \quad (3.12)$$

sujeito a:

$$Flexibilidade_{mnima_{i,j}} \leq P_{AC_{i,j}} \leq Flexibilidade_{mxima_{i,j}}$$

$$Flexibilidade_{mnima_{i,j}} \leq P_{VE_{i,j}} \leq Flexibilidade_{mxima_{i,j}}$$

$$P_{termo_{i,j}} \in \{0; P_{termo_{i,j}}\}$$

$$P_{frigi_{i,j}} \in \{0; P_{frigi_{i,j}}\}$$

Onde,

$i$  - Incremento no tempo

$j$  - Incremento no número de cenários

$P_{AC_{i,j}}$  (kW) - Potência do ar condicionado para a habitação

$P_{VE_{i,j}}$  (kW) - Potência do veículo elétrico para a habitação

$P_{termo_{i,j}}$  (kW) - Potência do termoacumulador para a habitação

$P_{frigi_{i,j}}$  (kW) - Potência do frigorífico para a habitação

$P_{inf_{total_i}}$  (kW) - Potência inflexível total da rede

$set - point_i$  (kW) - Limite definido pelo operador da rede/comercializador

$n$  - número de habitações

Ao utilizar-se o módulo para representar esta otimização surgiu o problema de este modelo de otimização ser não-linear. É, portanto, necessário, transformar este modelo num modelo de otimização linear para que seja mais rápido e fácil resolve-lo. Assim, foi utilizada a seguinte transformação baseada num artigo publicado por R.J. Bessa e M.A. Matos [21]:

$$\text{minimizar} \quad V \quad (3.13)$$

sujeito a:

$$\begin{aligned} set\ point_i - P_{inf_{total_i}} - \sum_{j=0}^n (P_{AC_{i,j}} + P_{VE_{i,j}} + P_{termo_{i,j}} + P_{frigi_{i,j}}) &\leq V \\ - (set\ point_i - P_{inf_{total_i}} - \sum_{j=0}^n (P_{AC_{i,j}} + P_{VE_{i,j}} + P_{termo_{i,j}} + P_{frigi_{i,j}})) &\geq V \end{aligned}$$

$$Flexibilidade_{mnima_{i,j}} \leq P_{AC_{i,j}} \leq Flexibilidade_{mxima_{i,j}}$$

$$Flexibilidade_{mnima_{i,j}} \leq P_{VE_{i,j}} \leq Flexibilidade_{mxima_{i,j}}$$

$$P_{termo_{i,j}} \in \{0; P_{termo_{i,j}}\}$$

$$P_{frigi_{i,j}} \in \{0; P_{frigi_{i,j}}\}$$

Onde as variáveis têm o mesmo significado acima descrito.

Nesta transformação, a função objetivo foi trocada por uma variável auxiliar  $V$ , que depois é utilizada nas restrições para representar o módulo utilizado anteriormente.

Assim é possível obter com maior rapidez as potências que irão ser consumidas em cada equipamento no instante seguinte.

### 3.5 Implementação em Python

Pode observar-se, no fluxograma seguinte, a sequência de passos deste problema onde é feito o cálculo minuto a minuto:

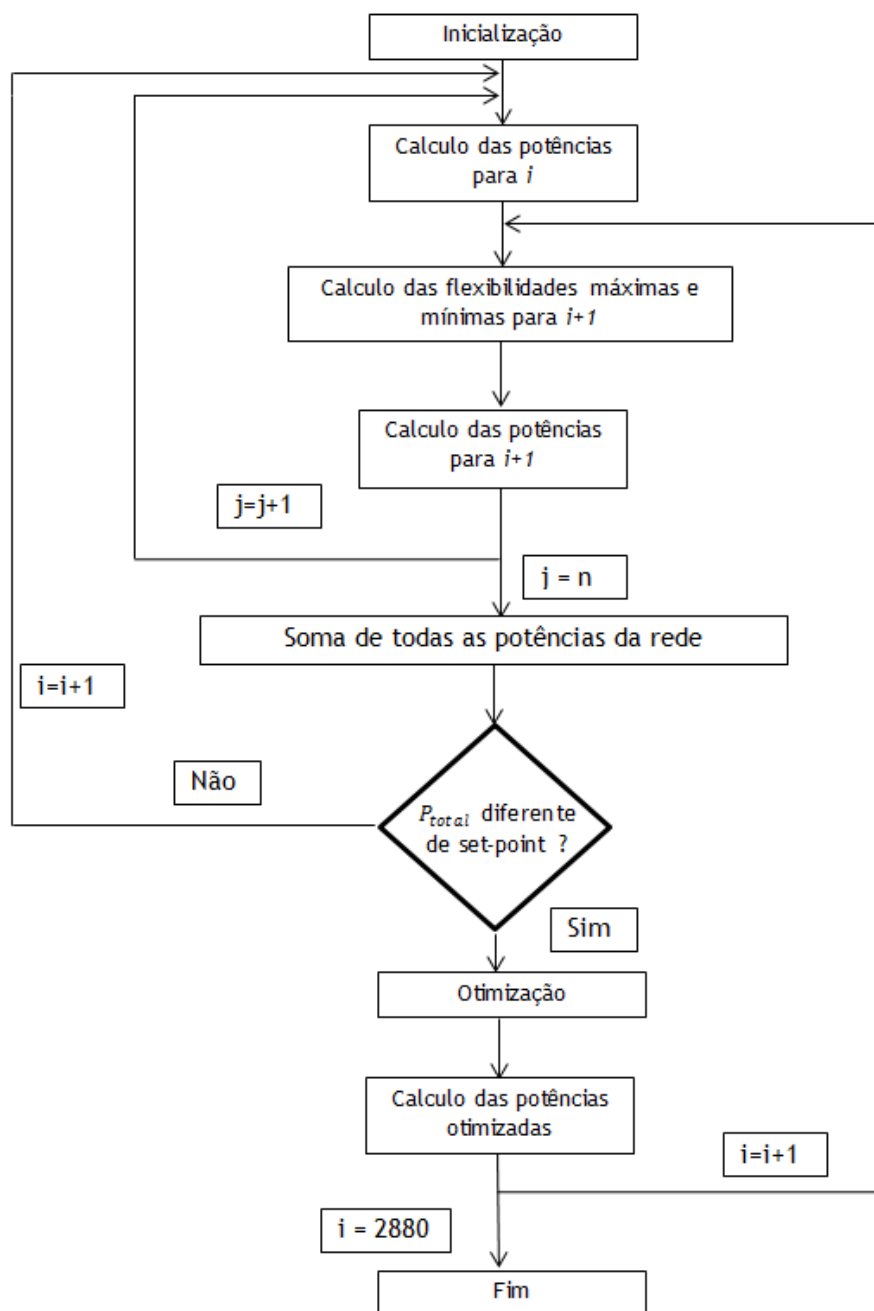


Figura 3.6: Fluxograma

Para se implementar este problema, foi necessário, antes de tudo, definir uma escala temporal. Assim, em cada instante  $i$  é calculada a potência consumida pelo ar condicionado, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico nesse instante, as flexibilidades máximas e mínimas desses equipamentos para o instante  $i+1$  e a potência consumida para  $i+1$ . De seguida, é testado esse valor obtido de potência para  $i+1$ .

Se a potência consumida para  $i+1$  for superior ao limite definido, a rotina entra, então, na parte do código correspondente à otimização, onde irão ser calculadas as novas potências que irão ser

consumidas pelos equipamentos no instante  $i+1$ .

Quando passa para o instante  $i+1$ , é verificado se no instante anterior houve ou não otimização. Se não houve, a rotina faz o calculo normal das potências. Se houve, utiliza as potências obtidas pelo código de otimização no instante anterior.

No final, todos os dados irão ser imprimidos num ficheiro CSV sendo possível fazer a sua consulta no EXCEL.

### 3.5.1 Ar Condicionado

O primeiro equipamento a ser modelizado é o ar condicionado.

É feito um teste de modo a saber-se que tipo de aquecimento tem esse cenário, sendo que poderá ser um de três tipos: “ON - Sempre”, “ON - Ocupada” e “OFF”, sendo que no primeiro caso é obrigatório que a habitação esteja sempre a uma temperatura de 19°C.

No segundo caso apenas é necessário que a habitação esteja a essa temperatura enquanto estiver ocupada. Como todos os vetores são inicializados a 0 foi necessário definir que a temperatura para o instante  $i=0$  seria, para todos os casos, igual a 19°C. Caso a habitação seja do tipo “ON - Sempre” é calculada a temperatura para  $i+1$ . Se essa temperatura for diferente de 19 °C é calculada a potência necessária para que a temperatura suba, ou desça até 19 °C. O  $P_i$  calculado é, então, testado para verificar se está dentro dos limites, ou seja, se é maior que 0 e inferior ao valor máximo de potência admitido para esse cenário. Este valor máximo depende da área da habitação. Pode-se verificar que o gráfico seguinte mostra a evolução da potência ao longo do tempo para este tipo de cenário:

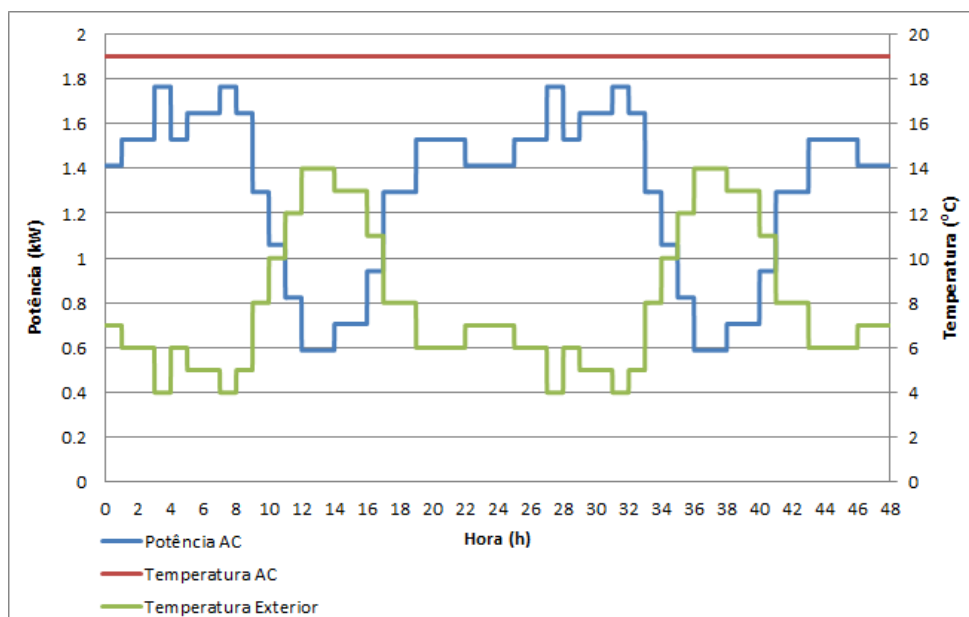


Figura 3.7: Potência consumida pelo AC em ON-Sempre



No caso de a habitação ser do tipo “ON - Ocupado” o método de cálculo é o mesmo mas apenas é calculada a potência quando a habitação está ocupada, sendo que o seu valor é 0 nos outros instantes.

Para se tornar a simulação mais próxima da realidade, as horas de saída e de chegada são geradas aleatoriamente seguindo uma função densidade probabilidade linear. Por exemplo, sendo a hora de chegada definida na geração dos cenários como 18h, na rotina essa hora poderá ser uma qualquer entre as 18h e as 19h.

O mesmo acontece para a hora de saída, que pode variar entre qualquer valor entre a hora definida e 1h antes dessa. Também foi definido que estes valores iriam variar para cada cenário definido, de modo a criar uma rede mais realista.

O gráfico seguinte mostra a evolução da potência para este cenário:

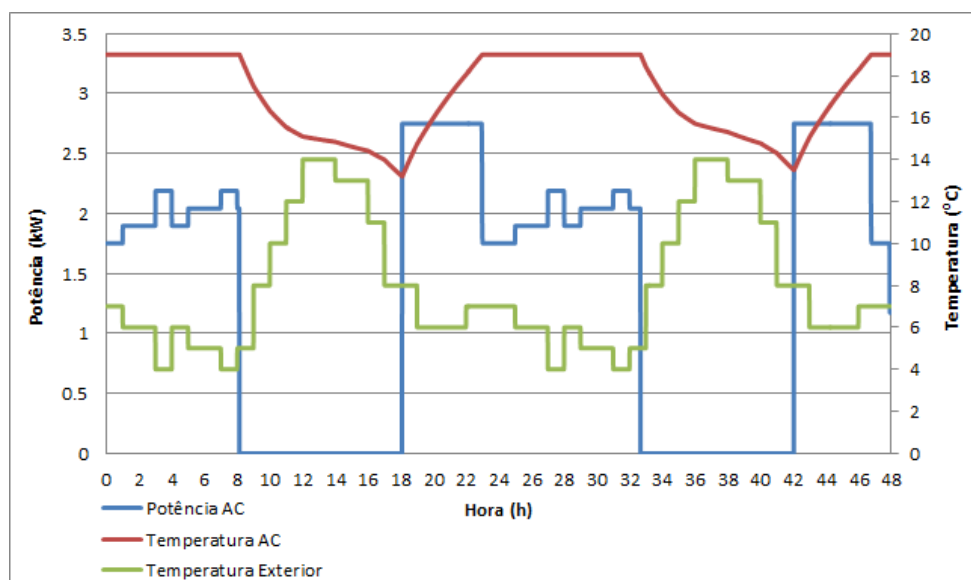


Figura 3.8: Potência consumida pelo AC em "ON - Ocupada"

Como se pode observar, nos instantes em que a habitação está desocupada, não existe consumo de potência.

No entanto, na hora de chegada a casa, o consumo de potência é o máximo definido para esta habitação pois é necessário que a temperatura suba o mais rapidamente possível até à temperatura pré definida.

Quando a temperatura volta a ser constante a potência consumida diminui. Por fim, caso a habitação seja do tipo “OFF”, a potência é sempre 0 pois assume-se que não existe aquecimento elétrico na habitação.

### 3.5.2 Frigorífico

Para o caso do frigorífico, considera-se que em todas as habitações existe um e que todos são alimentados a eletricidade. Assim, foi necessário definir uma temperatura inicial para o compar-

timento dentro do frigorífico, sendo, essa, diferente para todos os cenários de modo a criar uma maior diversidade.

Tal como no ar condicionado, é calculada a temperatura para o instante  $i+1$  tendo por base o valor da temperatura para  $i$ .

A temperatura em  $i+1$  é, então, testada e, se for superior a  $8^{\circ}\text{C}$ , é ligado o sistema de refrigeração passando, então, a consumir potência.

Quando a temperatura é inferior a  $8^{\circ}\text{C}$ , é calculada a diferença entre a temperatura nesse instante e no instante imediatamente anterior. Se essa diferença for maior que zero, ou seja, a temperatura estiver a descer, o sistema encontra-se na banda de histerese, logo a potência mantém-se ligada até a temperatura atingir o limite mínimo. Quando a diferença entre as temperaturas dá menor que zero, significa que a temperatura está a subir, logo a potência mantém-se desligada.

Obtém-se, assim, o seguinte gráfico para a evolução da potência e da temperatura num frigorífico de uma habitação:

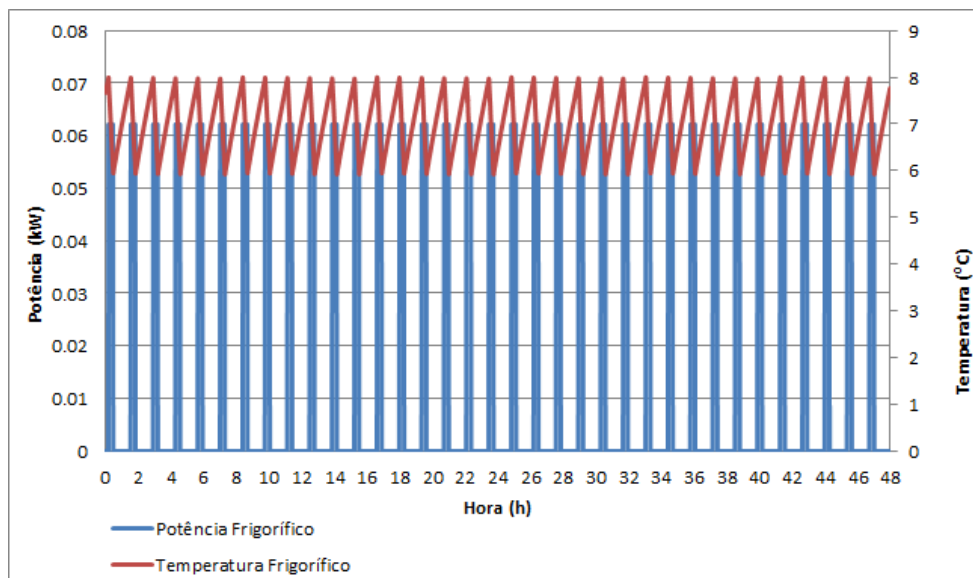


Figura 3.9: Temperatura Frigorífico

Como se pode observar, enquanto a temperatura desce, a potência continua a ser consumida de modo a que temperatura continue a descer até aos  $6^{\circ}\text{C}$ , desligando o sistema de refrigeração apenas aí. Ao desligar esse sistema, a temperatura sobe até ao limite máximo admitido.

Ao se adotar este sistema de banda de histerese é possível evitar variações bruscas de potência em instantes adjacentes.

### 3.5.3 Termoacumulador

O termoacumulador pode, também, consumir energia elétrica, assumindo o estado de “ON”, ou, caso não consuma, assume o estado “OFF”, sendo que a potência consumida nesse estado será sempre 0 kW.

É, também, necessário definir uma temperatura inicial da água, pois os vetores são todos inicializados a 0, o que não corresponderia à realidade. Assim, foi utilizado a função densidade probabilidade linear, para se obter uma temperatura inicial entre 58°C e 62°C, diferente para cada cenário definido, obtendo-se, portanto, o seguinte gráfico da evolução da potência consumida e da temperatura do equipamento:

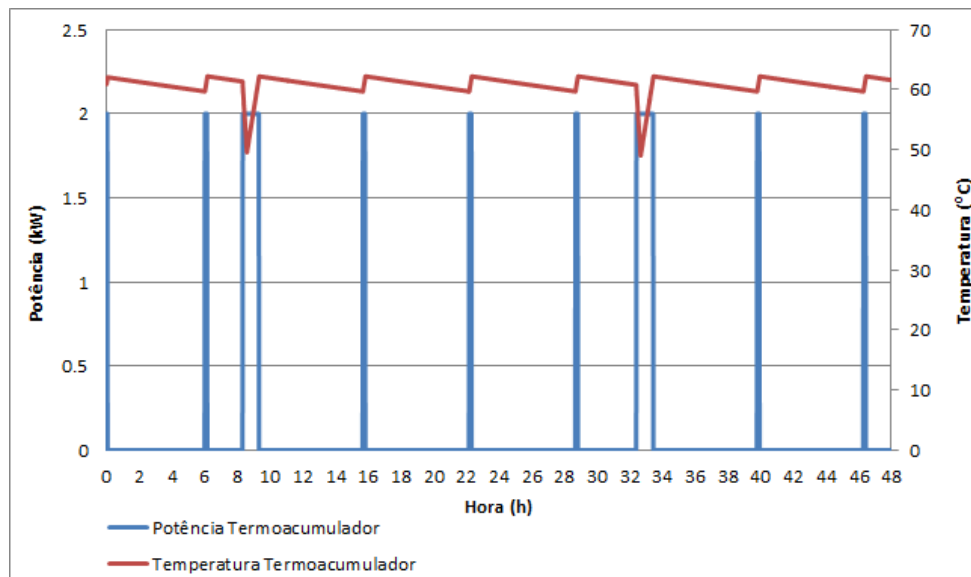


Figura 3.10: Temperatura Termoacumulador

Como se pode verificar, o equipamento liga quando se atinge os 60°C e continua ligado até se atingir o valor máximo de 62°C devido à banda de histerese definida.

Também se pode verificar que, quando ocorre um banho, a temperatura desce até 50°C e que em todo esse intervalo a potência continua ligada. Isto ocorre pois, durante o banho, é consumida água quente proveniente do reservatório, sendo que essa água quente é substituída por água fria, o que faz diminuir a temperatura da água dentro do reservatório. Assim, é necessário que o sistema de aquecimento de água continue ligado durante todo o banho de modo a que a temperatura da água dentro do reservatório não desça para níveis proibitivos.

### 3.5.4 Veículo Elétrico

Por fim, foi necessário fazer o mesmo estudo para o veículo elétrico. Assim, é necessário verificar se, para cada habitação escolhida, existe ou não veículo elétrico. Após esta análise, no instante  $i$  que corresponde à hora de chegada a casa é gerado um valor para o estado da bateria, mais uma vez utilizando a função densidade probabilidade linear utilizada nos outros equipamentos com o objetivo de criar maior diversidade.

Se esse valor for superior a 60% definiu-se que não seria necessário carregar o veículo elétrico. Se for inferior, o carro começa a carregar até a bateria ficar completamente carregada, deixando de consumir potência.

Deste modo, é possível obter os gráficos da evolução do estado de carregamento da bateria e da potência consumida para o seu carregamento numa habitação:

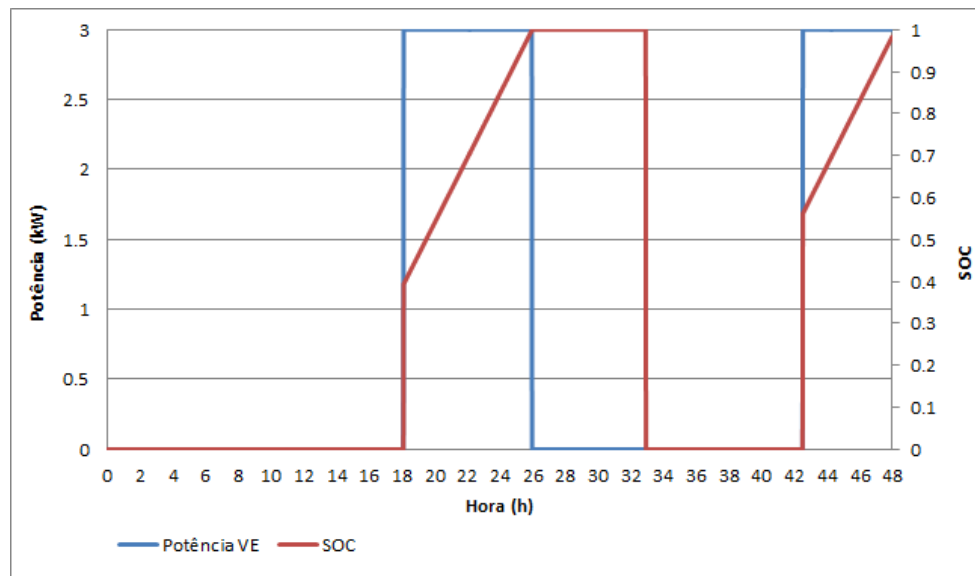


Figura 3.11: Potência consumida pelo VE

Tal como foi dito, pode-se observar que o carro consome potência até o estado de bateria atingir 100%, desligando o carregamento a partir daí e mantendo-se o estado de bateria nos 100%.

No período correspondente ao segundo dia, o estado da bateria na chegada a casa é diferente do valor do primeiro dia pois considera-se que o utilizador poderá ter, ou não, a possibilidade de efetuar um carregamento fora da habitação, ocorrendo, portanto esta diferença.

### 3.5.5 Resultados para uma habitação

Por fim, pode-se observar nos gráficos seguintes a potência total para uma habitação com as seguintes características: aquecimento –“ON - Sempre”, termoacumulador, frigorífico e veículo elétrico – “ON”. Para além disso é apresentado outro com as potências discriminadas por equipamento:

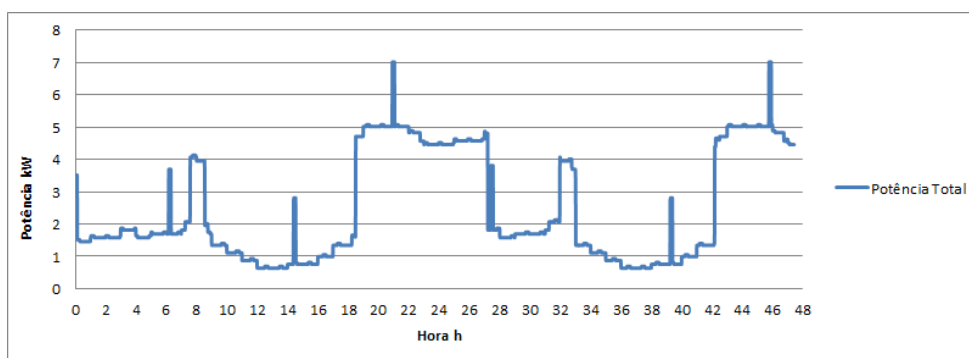


Figura 3.12: Potência Total Consumida

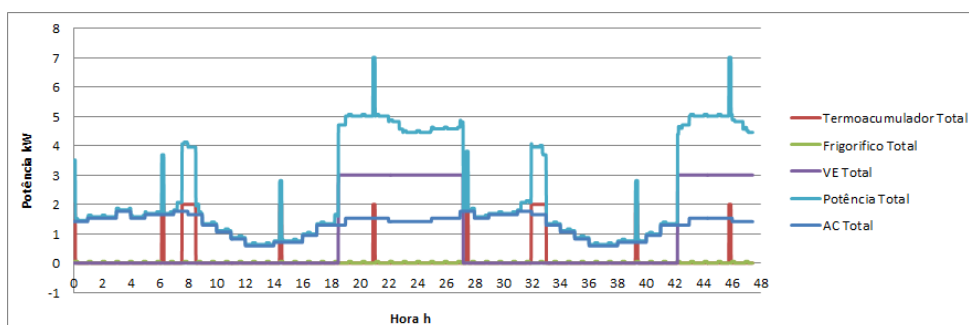


Figura 3.13: Potência Discriminada

Numa primeira observação pode-se concluir que o ar condicionado é o principal consumidor de energia na habitação, pois o consumo total segue, na maior parte dos períodos, o consumo de potência pelo ar condicionado.

Também se pode observar, que a existência de subidas abruptas de potência de cerca de 2 kW correspondem à ligação do termoacumulador quando a temperatura desce para valores abaixo dos 60°C. Para além disto, pode-se também observar que as horas de banho estão situadas entre as 8 e as 9h, aproximadamente, devido ao consumo constante de 2 kW.

Por fim, verifica-se que o grande aumento de cerca de 3kW de potência consumida pouco depois das 18h, corresponde ao início do carregamento da bateria do veículo elétrico na hora de chegada à habitação pelo seu ocupante.

No gráfico seguinte é apresentada a potência total consumida e a potência inflexível, ou seja, aquela que não pode ser controlada:

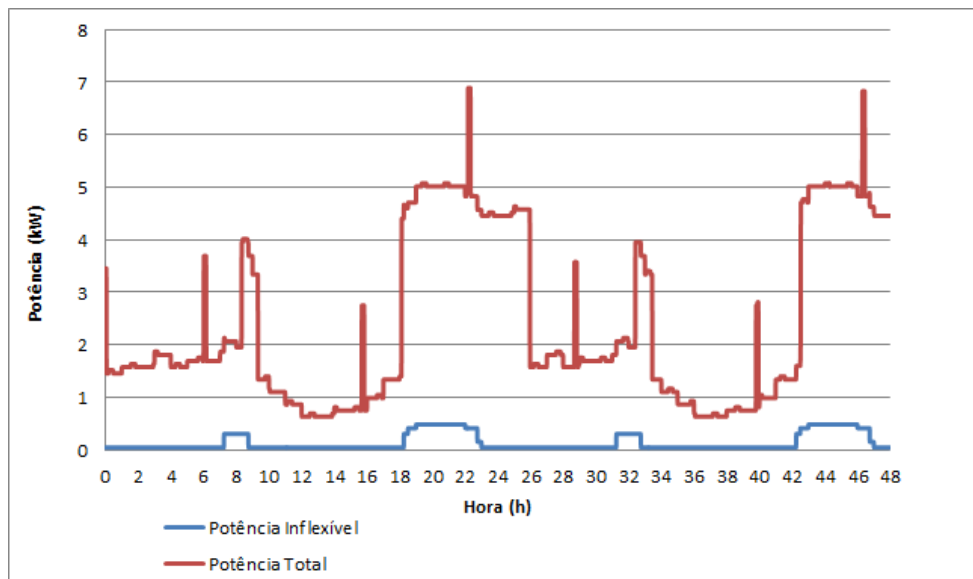


Figura 3.14: Comparação entre Potência Total e Potência Inflexível

Como se pode observar, existe um maior consumo deste tipo de potência na hora de chegada a casa até à meia-noite.

### 3.5.6 Implementação da flexibilidade

Para além da potência consumida em cada habitação no instante  $i$  e da potência consumida para o instante  $i+1$ , é necessário calcular, também, as potências máximas e mínimas que cada equipamento terá a capacidade de consumir de acordo com as zonas de conforto definidas pelo consumidor.

Assim, para cada equipamento de cada habitação, é necessário calcular as flexibilidades máximas e mínimas que, no instante  $i+1$ , poderão ser consumidas pelos equipamentos. Deste modo, foram utilizadas as fórmulas apresentadas no sub-capítulo 3.3.

### 3.5.7 Implementação da otimização

Para se implementar a otimização, foi necessário decidir qual biblioteca se iria utilizar, optando-se, então, pela biblioteca *GLPK (GNU Linear Programming Kit)*.

Para definir a condição de entrada no processo de otimização, foi decidido que, caso a potência em  $i+1$  fosse superior a uma potência limite, o vetor set-point poria 1 nessa posição, entrando, de seguida, no processo de otimização.

Ao entrar nesse processo é definida a função objetivo. Para além disto, é necessário definir quais as habitações prioritárias, ou seja, em quais habitações se irá, primeiro, fazer a otimização da potência consumida. Para isso foi utilizada a seguinte expressão para se definir a prioridade de cada habitação:

$$cen_{pre} = (flexibilidade_{maxtotal_{i,j}} - flexibilidade_{mintotal_{i,j}}) \cdot peso \quad (3.14)$$

Onde,

$flexibilidade_{maxtotal}$  - Soma da flexibilidade máxima dos quatro equipamentos da habitação;

$flexibilidade_{mintotal}$  - Soma da flexibilidade mínima dos quatro equipamentos da habitação;

peso - Peso dado a cada habitação. Este valor é gerado pela função densidade probabilidade linear utilizada anteriormente e o seu valor pode variar entre 0 e 1.

Aplicando a fórmula acima descrita, é possível dar prioridade às habitações mais flexíveis, ou seja, as habitações onde é mais fácil otimizar as potências consumidas devido a terem uma maior flexibilidade. Estas habitações serão as primeiras a serem otimizadas, obtendo-se, então, um vetor que, em cada posição, tem a prioridade de cada habitação do sistema.

Para se fazer a otimização do problema foi utilizada a metodologia 3.13 explicada no subcapítulo 3.4. É necessário, então, definir quais são as variáveis de decisão, ou seja, que equipamentos irão ser utilizados para se fazer esta otimização. Como é obvio, apenas os equipamentos considerados “ON” em cada cenário é que irão ser utilizados.

De seguida, foram criadas as restrições do problema, ou seja, as potências foram limitadas aos seus limites máximo e mínimos, de acordo com a flexibilidade.

Com todos os dados necessários já obtidos é feita, então, a otimização das potências consumidas em cada habitação, de acordo com as prioridades definidas, obtendo-se a potência discriminada para cada equipamento que irá ser consumida no instante  $i+1$ .

### 3.5.8 Implementação da otimização para um cenário

Para se poder observar de melhor forma a aplicação do modelo de otimização desenvolvido é necessário aplicá-lo a uma habitação apenas.

O cenário escolhido caracteriza-se por ser uma casa do tipo T1, com um ocupante, com todos os equipamentos a funcionar a eletricidade. O banho ocorre no período da manhã e o veículo elétrico é ligado à rede na hora de chegada a casa. O tipo de aquecimento é um “ON - Sempre”.

Pode-se verificar no gráfico seguinte a comparação entre a potência sem otimização e com otimização para um cenário durante o período de dois dias, sendo que a potência limite que se definiu foi 4kW:

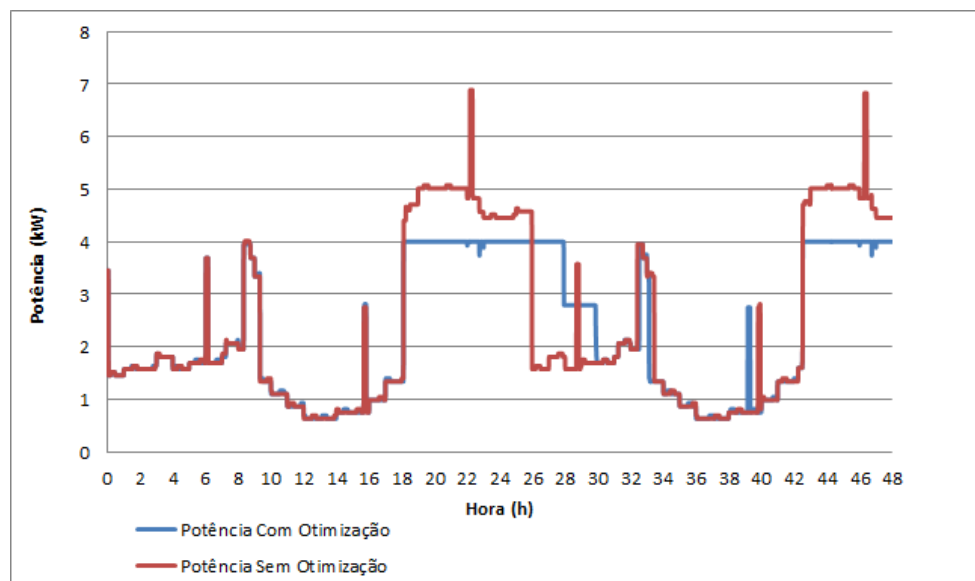


Figura 3.15: Potência Otimizada

Como se pode verificar a potência sem otimização ultrapassa o limite estipulado em dois períodos do dia. O primeiro ocorre entre as 8h e as 9h, tanto no primeiro dia como no segundo, correspondendo a uma altura de banhos. O outro ocorre às 18h00 tanto no primeiro dia como no segundo. Essa hora corresponde à hora de chegada a casa e consequente ligação do veículo elétrico à rede, provocando o aumento de 3kW como se observa no gráfico.

Ao atingir o limite máximo, a potência foi cortada, mantendo-se constante e igual a 4 kW durante o período em que seria superior e, também, durante os minutos seguintes. Este efeito ocorre pois a carga que não pode ser consumida devido ao limite foi transferida para uma altura mais favorável, quando o limite já não é ultrapassado, de modo a que os equipamentos voltem às condições iniciais de funcionamento.





## Capítulo 4

# Resultados

Neste capítulo irão ser apresentados os resultados da implementação do modelo produzido para o caso de uma habitação e, também, para dois casos de estudo diferentes.

Inicialmente, é criada uma rede de distribuição de baixa tensão onde a metodologia criada irá ser testada. No primeiro caso de estudo, onde a rede está em modo normal de operação, foi definido que as potências consumidas na rede teriam de ser otimizadas de acordo com a quantidade de energia comprada pelo comercializador.

No segundo caso de estudo, considera-se que a rede está a operar em modo de emergência e que o operador da rede define uma potência limite de consumo que não poderá ser ultrapassado. Também serão retiradas conclusões sobre a aplicação do modelo desenvolvido aos dois casos de estudo.

### 4.1 Rede de Distribuição

Para se verificar se a estratégia criada é passível de ser aplicada na realidade, é necessário aplicá-la a uma rede de distribuição em baixa tensão fictícia.

Inicialmente foi necessário definir esta rede de distribuição em baixa tensão, que representasse fielmente uma rede real. Assim, considerou-se a seguinte rede para estudo:

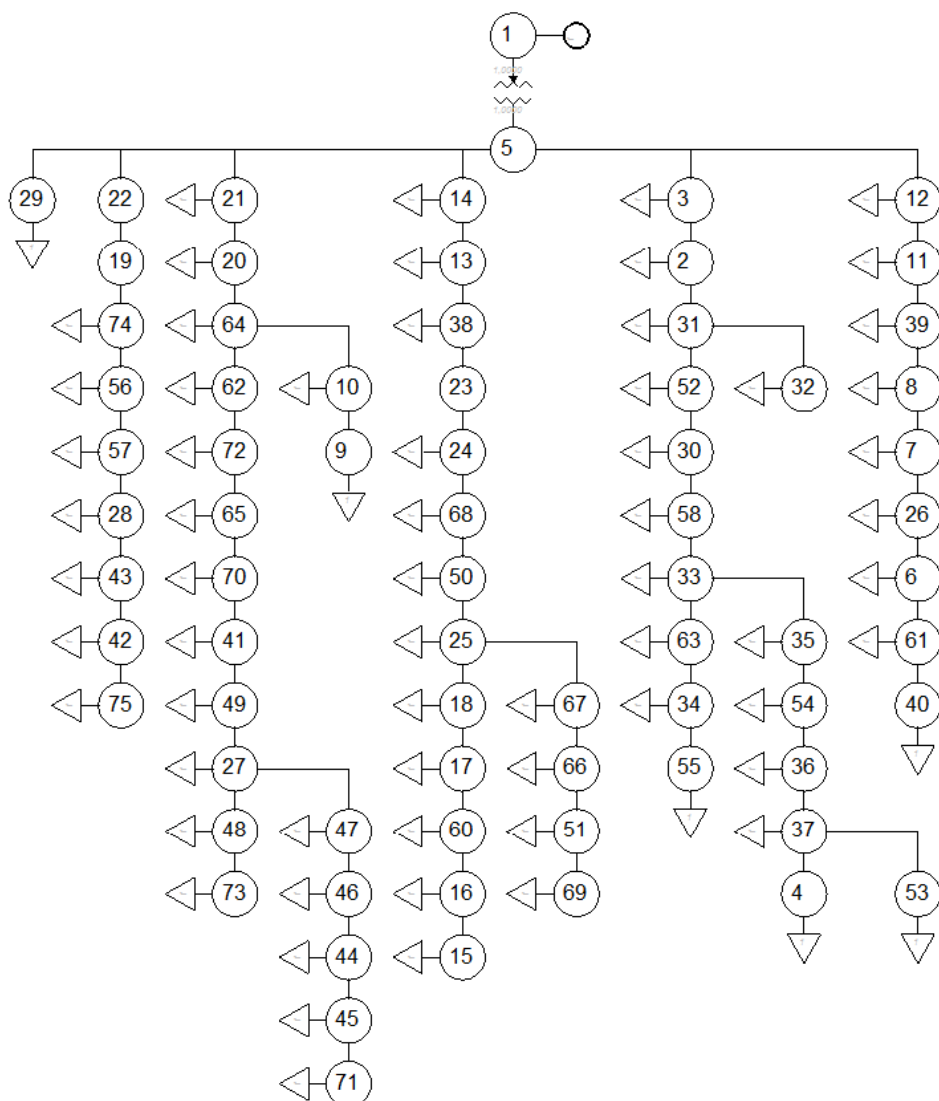


Figura 4.1: Rede distribuição em BT

Com base nesta rede, e sabendo que o transformador existente no posto de transformação, tem um limite de potência de 400kW, podendo, em certos períodos, este valor ser ultrapassado, foram atribuídas habitações fictícias a cada barramento de modo a manter-se equilíbrio na rede, ou seja, de modo a que todos os *feeders* tenham um número aproximado de habitações.

Não foram considerados, no entanto, os trânsitos de potência nos ramos da rede, as perdas de energia nem o consumo de energia reativa.

Como numa rede real tanto existem casas isoladas como apartamentos, definiu-se que nesta rede iriam existir diversos barramentos onde existiriam prédios, nomeadamente os barramentos 21, 25, 32, 40, 63, 65, 69, 70, 71, 72 e 75. Nestes apartamentos apenas podem existir habitações do tipo T1, T2 e T3. Poderá observar-se na tabela B.1 do anexo A as habitações discriminadas por barramento, ocupantes das habitações e tipo de aquecimento, termoacumulador e veículo elétrico.

Também foi necessário ter em atenção o surgimento de picos abruptos de consumo de potência quando ocorre a hora de chegada e começa o carregamento do veículo elétrico. Assim, restringiu-se que, no caso do veículo elétrico, metade das habitações teriam de possuir o equipamento e a outra metade não poderia possuir.

No caso do aquecimento, também ocorre o mesmo problema, com os cenários definidos como “ON - Ocupada”. Assim, considera-se que metade das habitações teriam aquecimento, tanto de um tipo como do outro, e que a outra metade não teria aquecimento elétrico.

Assim, consegue-se obter uma rede com 91 habitações e com uma potência de pico de 450kW.

É mostrado, de seguida, um gráfico que compara a potência total consumida na rede com a potência inflexível :

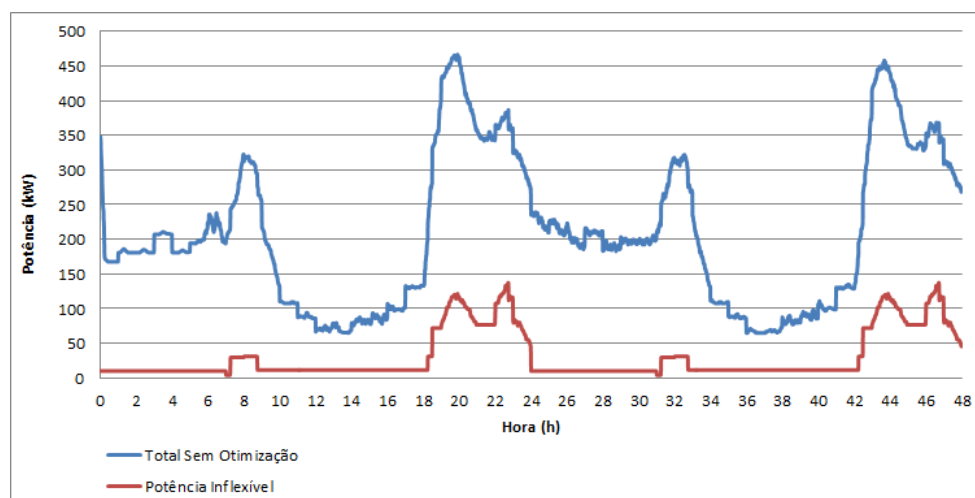


Figura 4.2: Potência total e discriminada por equipamento

Verifica-se que o período crítico de consumo de potência na rede é entre as 18h e as 20h pois é quando se dá a hora de chegada dos ocupantes às habitações, ligando-se os veículos elétricos e ocorrendo os banhos do período da noite.

## 4.2 Caso de Estudo 1

Neste primeiro caso de estudo irá fazer-se uma otimização das potências assumindo-se a existência de um comercializador de energia a operar na rede.

Assume-se, então, que o comercializador compra uma certa quantidade de energia para o dia seguinte e, caso o consumo se desvie muito dessa energia, o comercializador é penalizado. Deste modo, é essencial que a curva de consumo de potência na rede se mantenha o mais próximo possível da curva de energia comprada pelo comercializador.

Assim foi definido que o *set-point* do comercializador seria inversamente proporcional à curva de preços, ou seja, o comercializador tentará que cada habitação consuma mais quando o preço da energia é inferior.

Retirou-se, então, os preços de mercado do site da OMEL [22] para dois dias de inverno diferentes.

Após a obtenção dos preços é criada a curva de potências que irá servir de *set-point*. Esta curva caracteriza-se por seguir um padrão inverso à curva de preço de mercado, ou seja, quanto maior for o preço, menor irá ser a potência consumida e vice-versa.

Assim, a fórmula utilizada para o calculo do *set-point* foi a seguinte:

$$setpoint = \frac{\frac{1}{P_{real}}}{\sum_{i=0}^{2880} \frac{1}{P_{real}}} \sum_{i=0}^{2880} P_i \quad (4.1)$$

Onde,

$P_{real}$  - Preço Real;

$P_i$  - Potência consumida em cada instante  $i$ ;

Obtendo-se, então, a seguinte curva de *set-point* que irá ser utilizada para se fazer a otimização da potência consumida na rede:

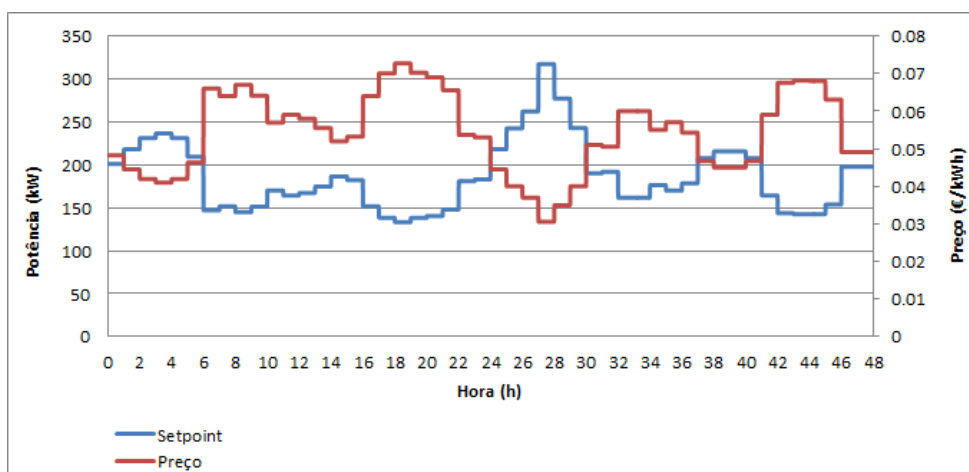


Figura 4.3: Comparação entre *Set-point* e preço

Em cada instante  $i$ , é comparada a potência total que se prevê consumir na rede em  $i+1$ , com a potência deste *set-point* também para  $i+1$ , fazendo então a otimização de modo a que os desvios sejam o mais pequenos possível.

Utilizando mais uma vez a rede construída no início do capítulo, obtém-se então o seguinte gráfico que compara a potência consumida com otimização e a curva de setpoint:

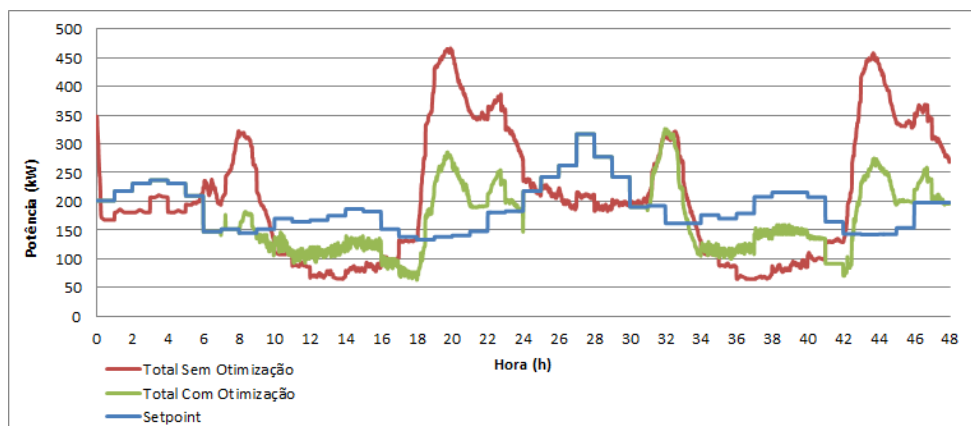


Figura 4.4: Comparação entre potência não otimizada, otimizada e *set-point*

No gráfico em baixo é possível ver o desvio entre a potência efetivamente consumida e potência do *set-point*:

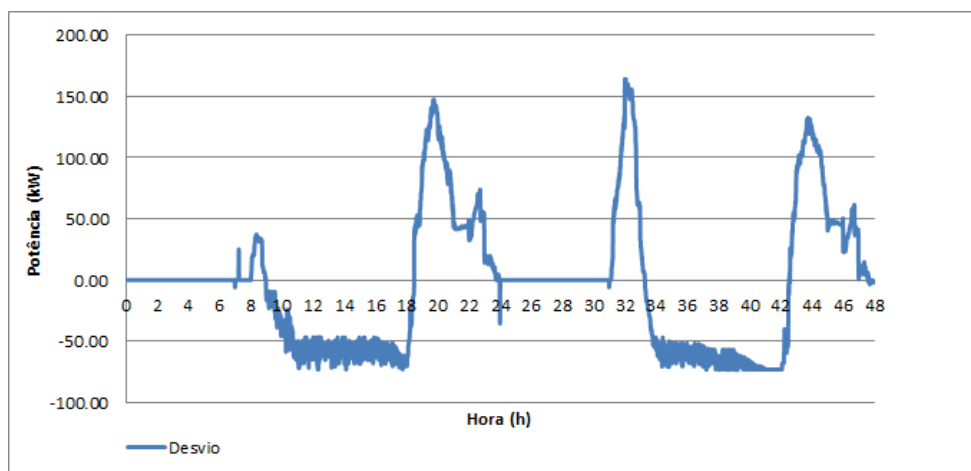


Figura 4.5: Desvio da potência com otimização e o *set-point*

Como se pode observar, os maiores desvios ocorrem às 18h tanto no primeiro dia como no segundo e às 8h do segundo dia. Isto deve-se ao fato de estas horas corresponderem aos períodos de banho tanto da noite como da manhã.

Como houve um atraso no carregamento dos veículos elétricos para não consumirem potência durante o período de ponta do primeiro dia, o final do carregamento ocorre entre as 8h e as 9h do segundo dia, como se pode verificar no gráfico seguinte:

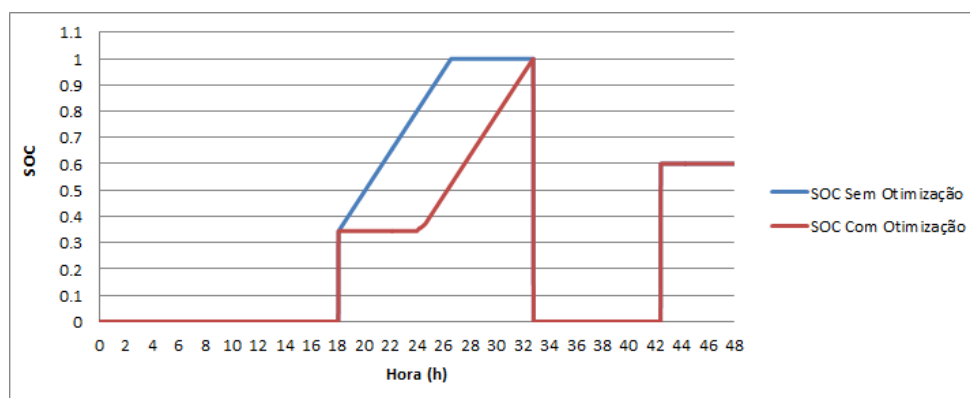


Figura 4.6: Estado de bateria do VE

Assim, o final do carregamento do veículo elétrico influencia o grande desvio que ocorre entre as 8h e as 9h do segundo dia. Apesar disto, e visto que o carregamento do veículo elétrico foi adiado até se atingir as 0h00, evitou-se o consumo de potência nas horas de pico onde o preço da energia é mais elevado. Transferiu-se este consumo para uma hora onde o preço de energia é inferior, provocando um apenas pequenos desvios entre as 0h e as 7h do segundo dia.

Como se pode observar, a potência otimizada iguala-se à potência definida no *set-point* sempre após as 0h00 tanto no primeiro dia como no segundo, mantendo-se nesse estado até às 6h00, correspondendo esse período ao período de vazio. Assim, verifica-se que nesses períodos houve um aumento do consumo de potência em comparação com a potência que seria consumida sem otimização.

Nos períodos seguintes, a potência otimizada, apesar de não se igualar à potência do *set-point*, consegue diminuir o desvio em comparação com a potência sem otimização, diminuindo o consumo de potência nos períodos em que o preço da energia é mais elevado e aumentando o consumo quando o preço é mais baixo.

Para além disto, pode-se observar também que, nos períodos de pico onde o preço da energia é mais elevado, existe uma redução bastante significativa, cerca de 100 kW, da potência consumida em relação à potência sem otimização, permitindo, assim, uma diminuição do desvio entre as potências consumidas e a energia obtida pelo comercializador.

Este fato ocorre pois, no caso sem otimização esse grande aumento de potência consumida correspondia ao carregamento do veículo elétrico.

Com este tipo de otimização é possível adiar o início do carregamento para um período onde o preço da energia não seja tão elevado.

Nos gráficos seguintes são apresentadas as evoluções da potência consumida e da temperatura do ar condicionado, termoacumulador e frigorífico:

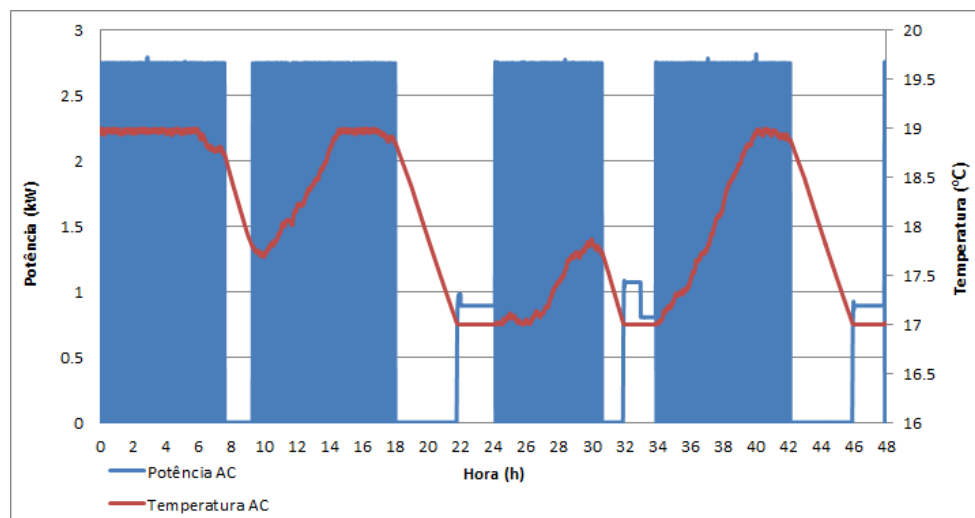


Figura 4.7: AC com otimização

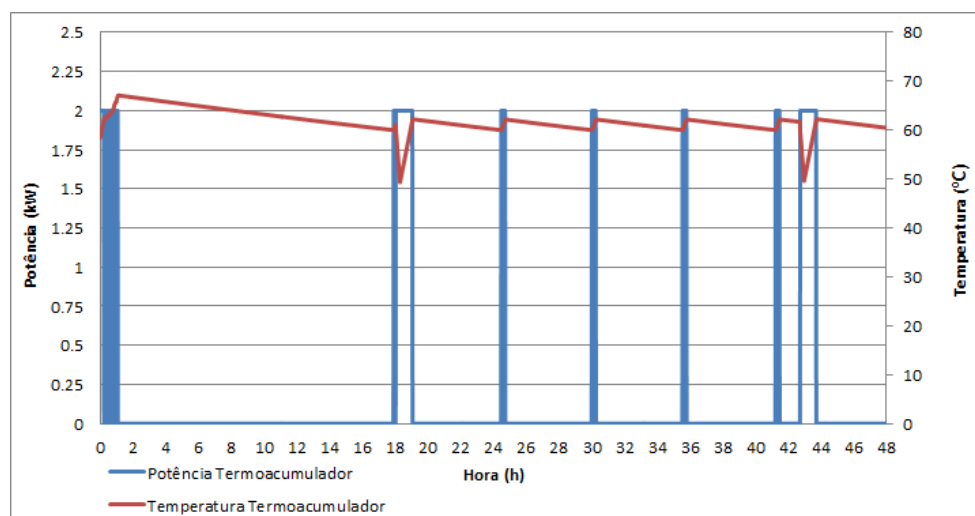


Figura 4.8: Termoacumulador com otimização



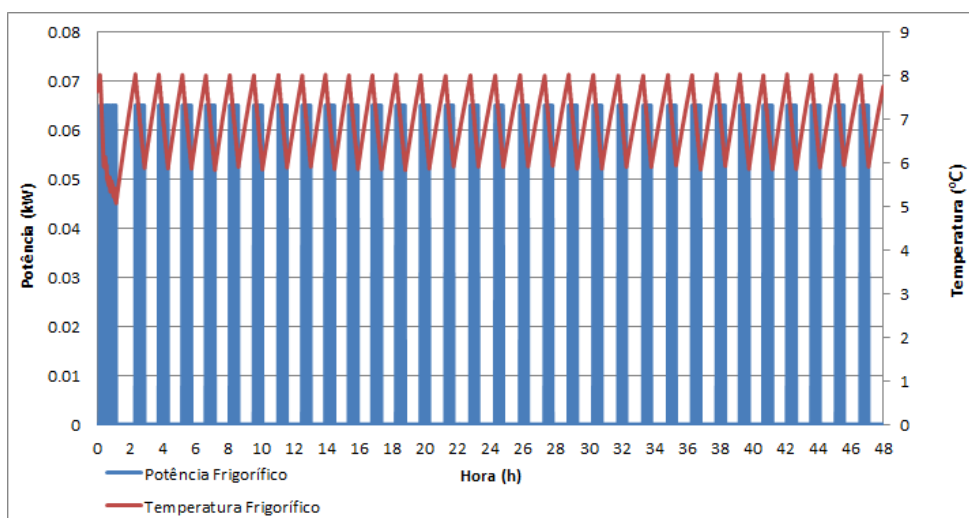


Figura 4.9: Frigorífico com otimização

Como se pode observar, em todos os gráficos houve alterações na sua forma em comparação com os gráficos apresentados no sub capítulo 3.5. Este fato acontece pois, devido à flexibilidade definida pelos ocupantes das habitações, houve possibilidade de fazer uma redução de consumo.

De modo a se fazer uma análise económica mais detalhada é necessário saber quanto é que o comercializador consegue poupar se a rotina de otimização for aplicada.

Assim é necessário saber quanto é que custa, em cada minuto, 1 kW de energia. Foi necessário utilizar a seguinte expressão para calcular o custo total da energia consumida:

$$C_{total} = \sum_{i=0}^{2880} \frac{p_{hora} P_{hora}}{60} \quad (4.2)$$

Onde,

C - Custo total nos dois dias

Dividindo, de seguida, este custo total pela energia consumida nos dois dias, obtém-se, por fim, o custo de 1 kW.

De modo a verificar se esta rotina traz benefícios para o comercializador é necessário fazer a comparação entre o custo obtido sem a otimização e o custo obtido com otimização, obtendo-se então os seguintes custos:

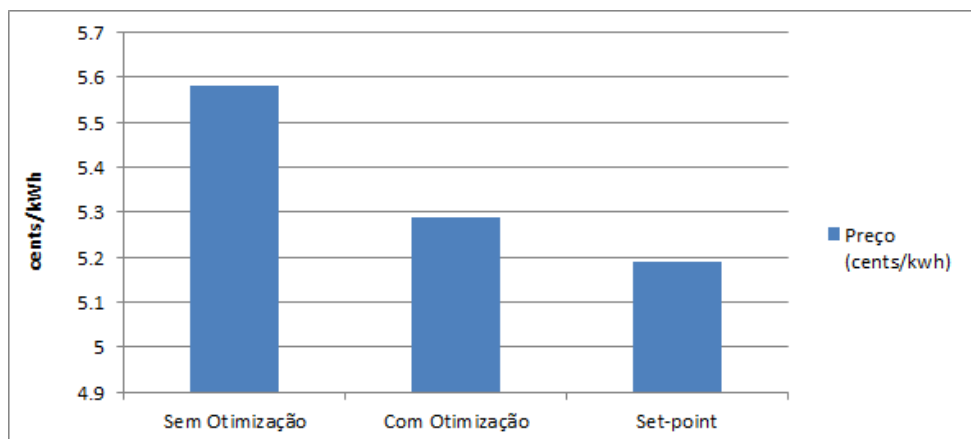


Figura 4.10: Preço

Como se pode observar, houve uma redução de 6% entre o custo sem otimização e o custo com otimização. O set-point indica o preço caso a potência tivesse seguido por completo a curva de set-point

Outro dado interessante é fato de ter havido uma redução significativa da energia consumida ao fim de dois dias:

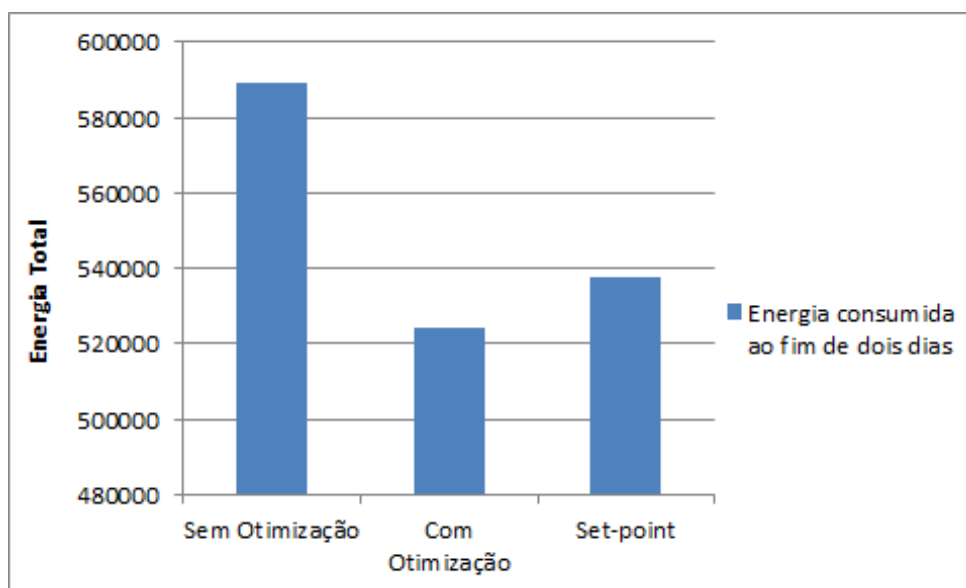


Figura 4.11: Energia

Como se pode observar, houve uma redução bastante significativa da energia consumida na rede ao fim de dois dias. Este fato ocorre pois, ao minimizar-se os desvios, reduziu-se ligeiramente os níveis de conforto dos donos das habitações (temperaturas mais baixas) o que leva a que potência consumida na rede nas horas de ponta (entre as 18h e as 20h) também seja menor.

Após a análise detalhada deste caso de estudo, pode-se concluir que este tipo de otimização traz grandes vantagens para o comercializador de energia pois, assim, consegue diminuir as suas penalizações que iriam resultar caso os desvios fossem mais elevados.

Pode-se concluir, também, que ao se utilizar a flexibilidade no processo de otimização é possível reduzir o consumo e os custos para o comercializador respeitando sempre as condições impostas pelos consumidores finais.

### 4.3 Caso de Estudo 2

Para este caso de estudo foi definido que a rede estaria a funcionar em modo de operação de emergência, tendo, portanto de cumprir as solicitações do operador da rede para redução de consumo, tendo em consideração os limites técnicos da rede.

Para este estudo foi considerado que a potência consumida nunca poderá ultrapassar o limite máximo do transformador.

Com a rede já definida previamente, foi aplicada a rotina desenvolvida de modo a fazer-se a otimização da rede com o objetivo de não se ultrapassar esse limite.

Após a aplicação, obtém-se o seguinte gráfico que compara a potência consumida com e sem otimização:

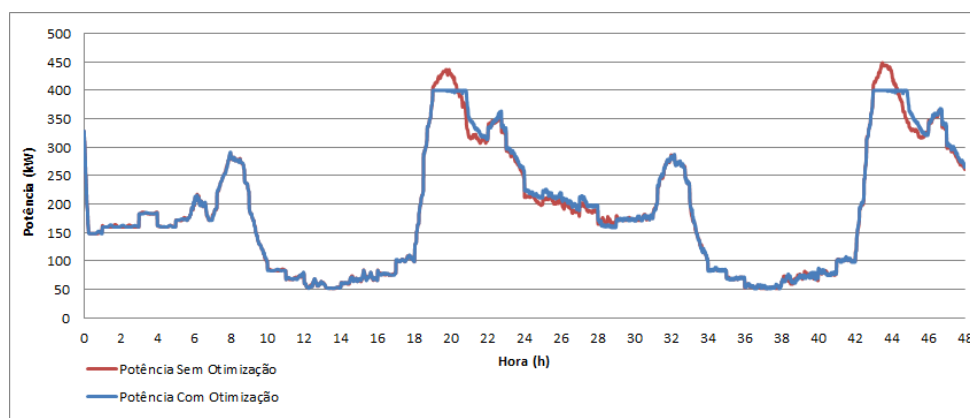


Figura 4.12: Potência com otimização e sem otimização

Inicialmente, pode-se verificar que a potência se situa relativamente estável, entre os 160kW e os 210kW.

Como se pode observar no gráfico, existem vários picos de consumo na rede utilizada que correspondem à hora de tomada dos banhos, tanto no período da manhã como no período da noite, seguindo-se um período de menor consumo de potência. Pode-se verificar também que na hora de chegada às habitações, tanto no primeiro como no segundo dia, o consumo de potência aumenta drasticamente de cerca de 120kW para quase 450kW. Isto deve-se à ligação dos carros elétricos para carregamento da bateria, da ligação do aquecimento nas habitações “ON - Ocupada” e também dos banhos no período da noite que são efetuados na hora de chegada também.

Após este período crítico a potência volta a diminuir lentamente até voltar a situar-se entre os 160kW e os 240kW sendo que este período já corresponde ao segundo dia.

Como se pode observar, caso não fosse aplicada a otimização, a potência ultrapassaria o limite máximo imposto em dois períodos que correspondem à hora de chegada às habitações.

Com a aplicação da otimização, verifica-se que a potência foi cortada nesses períodos, mantendo-se constante.

Nos minutos imediatamente seguintes pode-se observar que o consumo otimizado, em vez de se voltar a igualar ao consumo sem otimização, como acontecia previamente, continua ligeiramente mais elevado.

Isto deve-se ao fato de a carga que não pode ser consumida no período de corte foi transferida para os instantes imediatamente seguintes, onde já não existe o problema de se ultrapassar o limite máximo da rede. Este fato ocorre pois é necessário que os equipamentos voltem ao seu estado de funcionamento em modo normal.

No gráfico em baixo, é possível observar a comparação entre a potência consumida pelos equipamentos e a potência total consumida na rede, já com otimização:

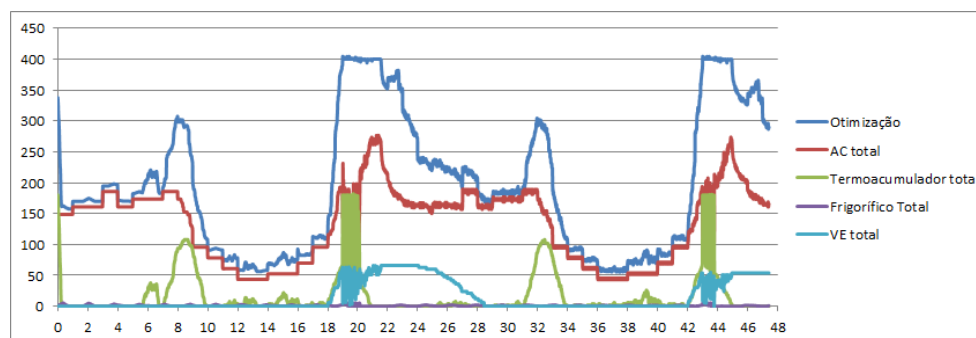


Figura 4.13: Potência com otimização e potências discriminadas por equipamento

É mostrado, agora, a evolução das potências e consumidas pelos quatro equipamentos apenas numa habitação:

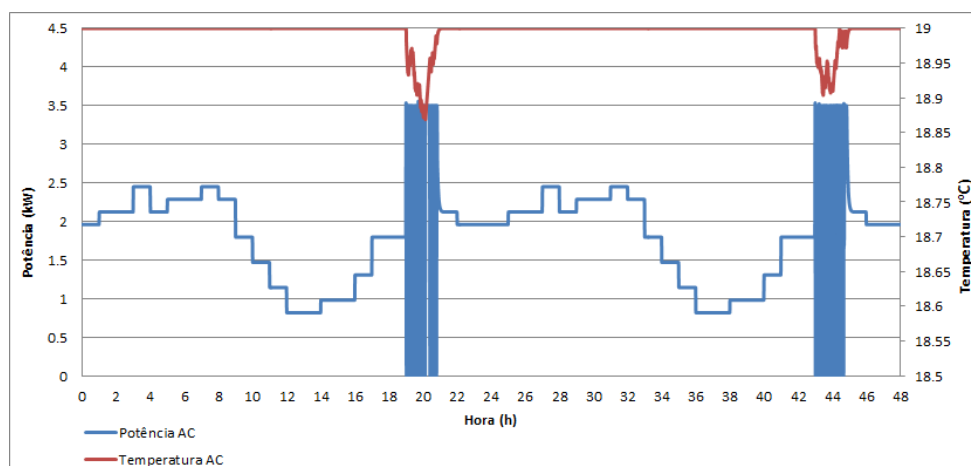


Figura 4.14: AC com otimização

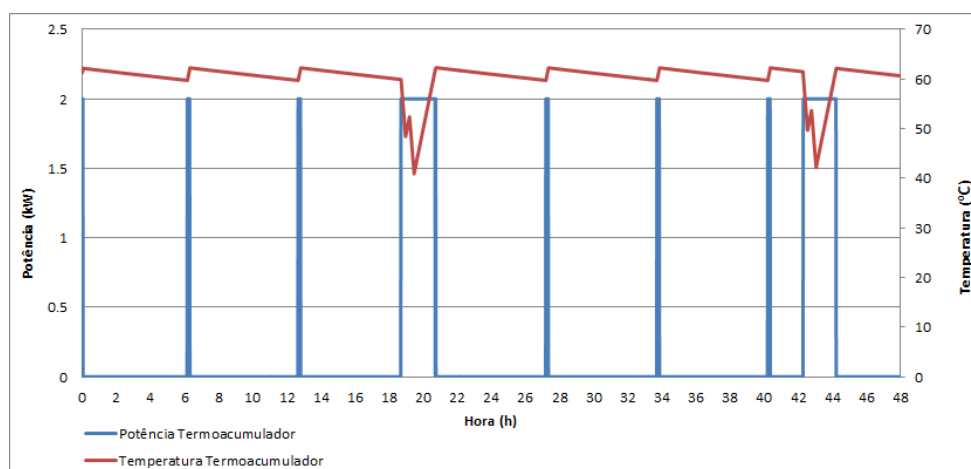


Figura 4.15: Termoacumulador com otimização

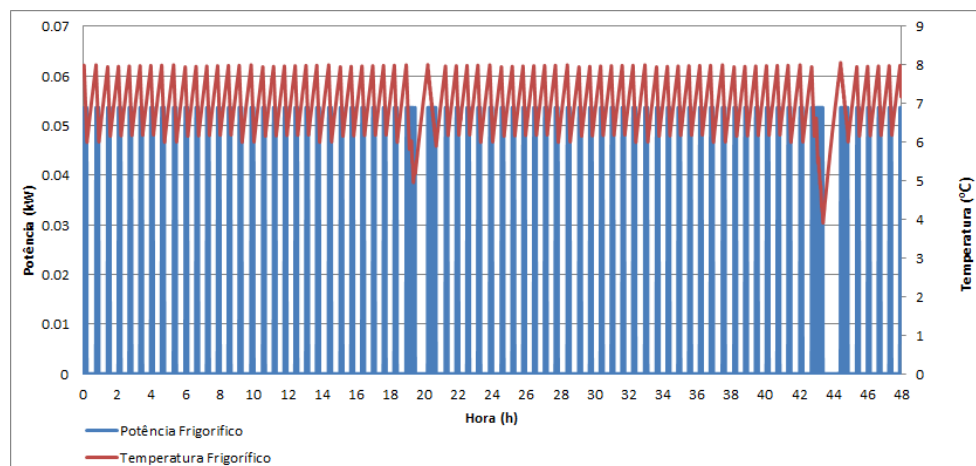


Figura 4.16: Frigorífico com otimização

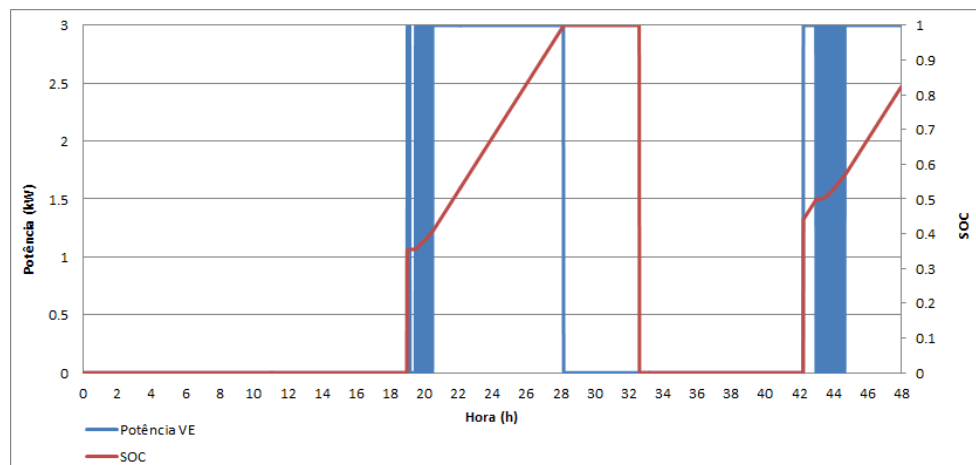


Figura 4.17: Frigorífico com otimização

Após a aplicação da estratégia criada ao caso de estudo definido pode-se concluir que, tal como no caso de estudo anterior, este modelo é passível de ser aplicado pois consegue cumprir com eficácia a otimização, através da redução da potência consumida, sem prejudicar, mais uma vez, as zonas de conforto definidas pelos utilizadores.



## Capítulo 5

# Conclusões

Este capítulo expõe as principais conclusões obtidas após a realização deste trabalho. Para além disto expõe, também, os objetivos alcançados e os possíveis trabalhos relacionados com este tópico que poderão ser desenvolvidos no futuro

### 5.1 Objetivos Alcançados

O desenvolvimento desta dissertação permitiu cumprir os objetivos propostos inicialmente uma vez que é possível fazer, com sucesso, uma otimização da potência consumida na rede de distribuição de baixa tensão.

Após este desenvolvimento, foi necessário aplicar o modelo a uma rede de distribuição de baixa tensão onde se incluem habitações com diferentes características e potências consumidas.

Na aplicação à rede foram considerados dois modos de operação da rede. O primeiro, funcionamento em modo normal, o comercializador é o gestor da rede e é do seu interesse que a potência consumida na rede seja o mais próximo possível da energia por ele adquirida. Ao se analisar os gráficos 4.10 e 4.11 pode-se verificar que o modelo consegue reduzir os custos e a potência consumida na rede com sucesso.

No segundo modo de operação da rede, funcionamento em modo de emergência, é considerado que existe um limite técnico na rede, neste caso a potência do transformador é limitada a 400kW o que leva a que a potência consumida na rede não possa ultrapassar esse valor. O operador da rede tem o poder, então, de enviar informações para cada habitação, com a potência que terá de reduzir de modo a que esse limite não seja ultrapassado. Pode-se observar o resultado dessa aplicação no gráfico 4.12 verificando-se que a potência consumida não ultrapassa esse limite técnico imposto.

Em nenhum dos casos, o consumidor foi prejudicado na zona de conforto que ele definiu.

Conclui-se, então, que os objetivos propostos para esta dissertação foram alcançados com sucesso.



## 5.2 Trabalhos futuros

Devido à duração limitada desta dissertação ainda ficaram alguns pontos por abordar sobre esta temática.

Deste modo, como trabalho futuro, será necessário incluir na estratégia desenvolvida os modelos das máquinas de lavar roupa e loiça, máquina de secar roupa, iluminações interna e externa, equipamentos de cozinha, computadores, televisões, box, e aparelhos indiferenciados de modo a que a estratégia consiga aplicar a otimização a todos os equipamentos dentro da habitação.

Visto que a otimização desenvolvida atua apenas ao nível da rede seria interessante incluir uma outra rotina de otimização que pudesse atuar ao nível dos equipamentos dentro da habitação.

Para além disto, seria interessante correr um trânsito de potências na rede de modo a fazer-se uma análise mais aprofundada ao nível das perdas e do trânsito de potência reativa que ocorrem ao fazer-se estas reduções de potência consumida.

## Anexo A

## Anexos

### A.1 Valores das áreas [1]

Tabela A.1: Áreas Utilizadas

Áreas	T1	T2	T3	Vivenda (T3)
Área mínima $m^2$	52	72	91	91
Área Utilizada $m^2$	55	80	100	170

### A.2 Valores utilizados no AC [2]

Tabela A.2: Dados AC

	Máximo	Mínimo
Potência $kW/m^2$	0.05.area	0.05.area
Capacidade térmica $kWm^2/C$	0.065.area	0.015.area
Resistência térmica $Cm^2/kW$	0.003.area	0.001.area

### A.3 Valores utilizados no Termoacumulador

Tabela A.3: Dados Termoacumulador

	Valor
Potência kW	2
Heat loss constant kW/C	0.001099
Capacidade térmica kJ/C	418.7
T. desejada C	60
Caudal kW	0.17
Tempo banho min	15

## A.4 Valores utilizados no Frigorífico [3]

Tabela A.4: Dados Frigorífico

	Máximo	Mínimo
Potencia W	70	50
Performance	3	3
Condutividade Térmica W/C	3.21	3.21
Temperatura C	8	6
Massa térmica Wh/C	32	7.9

## A.5 Valores utilizados no Veículo Elétrico

Tabela A.5: Dados VE

	Valor
Potencia kW	3
Rendimento	90
Capacidade Bateria kW	35
SOC inicial	-

## Anexo B

# Anexos

### B.1 Cenários Utilizados nos Casos de Estudo

Tabela B.1: Cenários de estudo utilizados

Barramento	Cenario	Habitacao	Ocupantes	VE	Ar condicionado	Termoacumulador
2	156	T1	1	On	On - Sempre	ON
3	2447	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
4	2064	Vivenda	3	ON	OFF	ON
6	2136	Vivenda	3	ON	ON - Ocupada	ON
7	20	T1	1	Off	OFF	ON
8	2190	Vivenda	3	Off	OFF	ON
9	1748	T3	4	ON	OFF	ON
10	12	T1	1	Off	OFF	ON
11	24	T1	1	Off	OFF	ON
12	2208	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON
13	2316	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
14	2532	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
15	2555	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
16	192	T1	1	ON	ON - Ocupada	ON
17	13	T1	1	Off	OFF	ON
18	14	T1	1	Off	OFF	ON
20	1992	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON
21	1416	T3	3	ON	OFF	ON
	1417	T3	3	ON	OFF	ON
24	2007	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON

Barramento	Cenario	Habitacao	Ocupantes	VE	Ar condicionado	Termoacumulador
25	1439	T3	3	ON	OFF	ON
	1440	T3	3	ON	ON - Sempre	OFF
26	2158	Vivenda	3	ON	ON - Ocupada	ON
27	2401	Vivenda	4	ON	OFF	ON
28	2483	Vivenda	4	ON	ON - Ocupada	ON
29	2400	Vivenda	4	ON	OFF	ON
30	2402	Vivenda	4	ON	OFF	ON
31	48	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
32	1740	T3	4	ON	OFF	ON
	1741	T3	4	ON	OFF	ON
33	15	T1	1	Off	OFF	ON
34	2065	Vivenda	3	ON	OFF	ON
35	2066	Vivenda	3	ON	OFF	ON
36	2014	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON
37	2230	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON
38	49	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
39	120	T1	1	ON	OFF	ON
40	1904	T3	4	Off	ON - Sempre	ON
	1905	T3	4	Off	ON - Sempre	ON
	1906	T3	4	Off	ON - Sempre	ON
	1907	T3	4	Off	ON - Sempre	ON
41	2540	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
42	2224	Vivenda	3	Off	ON - Sempre	ON
43	121	T1	1	ON	OFF	ON
44	122	T1	1	ON	OFF	ON
45	123	T1	1	ON	OFF	ON
46	2334	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
47	806	T2	2	ON	ON - Sempre	ON
48	2441	T1	1	Off	OFF	ON
49	2476	Vivenda	4	ON	ON - Ocupada	ON
50	2442	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
51	84	T1	1	Off	ON - Ocupada	ON
52	66	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
53	2338	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
54	2554	Vivenda	4	Off	ON - Sempre	ON
55	1511	T3	3	ON	ON - Ocupada	ON

Barramento	Cenario	Habitacao	Ocupantes	VE	Ar condicionado	Termoacumulador
56	1835	T3	4	ON	ON - Ocupada	ON
57	1752	T3	4	ON	OFF	ON
58	158	T1	1	ON	ON - Sempre	ON
60	827	T2	2	ON	ON - Sempre	ON
61	51	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
62	2482	Vivenda	4	ON	ON - Ocupada	ON
63	1742	T3	4	ON	OFF	ON
	1743	T3	4	ON	OFF	ON
64	2443	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
65	50	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
	277	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
	372	T1	2	Off	ON - Sempre	ON
	640	T1	2	Off	ON - Ocupada	ON
	747	T2	2	Off	ON - Ocupada	ON
	1075	T2	3	Off	ON - Ocupada	ON
66	2446	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
67	1763	T3	4	ON	OFF	ON
68	2396	Vivenda	4	ON	OFF	ON
69	193	T1	1	ON	ON - Ocupada	ON
	444	T1	2	ON	OFF	ON
	458	T1	2	ON	OFF	ON
	774	T2	2	ON	OFF	ON
	1098	T2	3	ON	OFF	ON
	1115	T2	3	ON	OFF	ON
70	1568	T3	3	Off	ON - Sempre	ON
	1569	T3	3	Off	ON - Sempre	ON
71	1618	T3	3	Off	ON - Ocupada	ON
	1619	T3	3	Off	ON - Ocupada	ON
72	1570	T3	3	Off	ON - Sempre	ON
	1571	T3	3	Off	ON - Sempre	ON
73	2444	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
74	2445	Vivenda	4	On	On - Sempre	ON
75	52	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
	67	T1	1	Off	ON - Sempre	ON
	714	T2	2	Off	ON - Sempre	ON
	715	T2	2	Off	ON - Sempre	ON



## Anexo C

# Anexos

### C.1 Perfis de consumo dos equipamentos não controláveis

Estes perfis foram retirados para o caso de uma habitação com as seguintes características:

- Vivenda
- 4 ocupantes
- Máquina de Lavar Roupas
- Máquina de Lavar Louça
- Máquina de Secar Roupas
- Fogão
- Televisão
- Computador
- Outros
- *Stand-By*

#### C.1.1 Iluminação Interior e Exterior

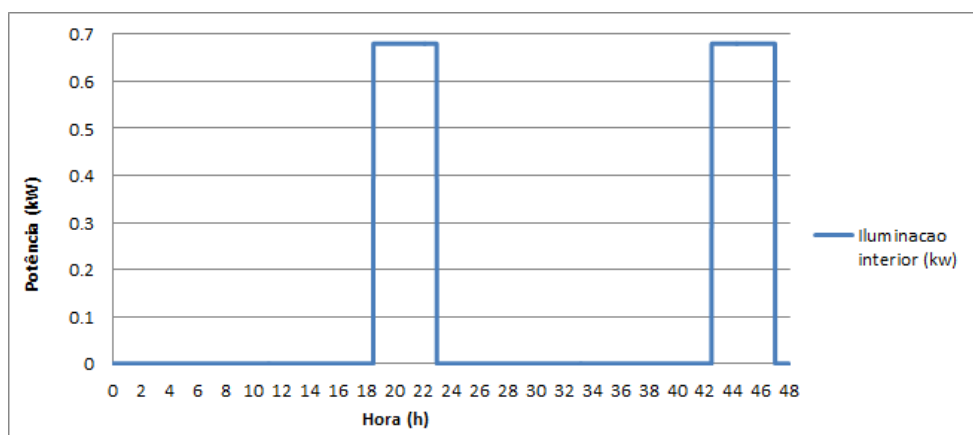


Figura C.1: Iluminação Interior



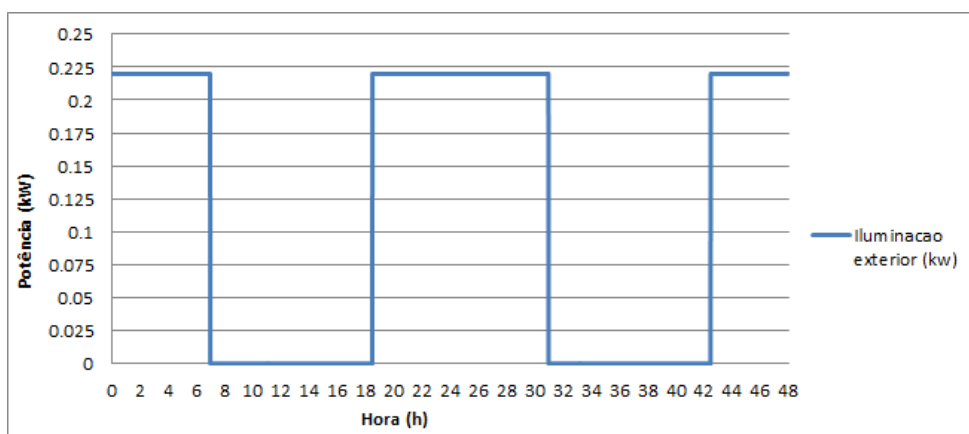


Figura C.2: Iluminação Exterior

### C.1.2 Máquina de Lavar Roupas

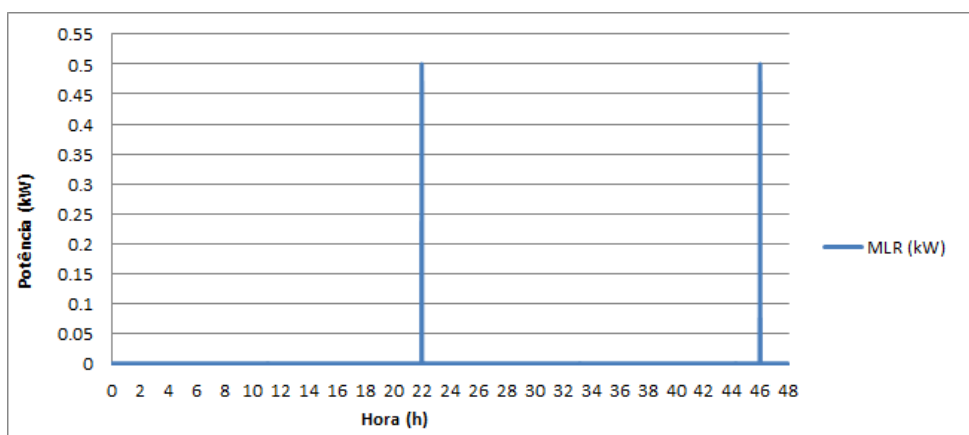


Figura C.3: Máquina Lavar Roupas

### C.1.3 Máquina de Lavar Loiça

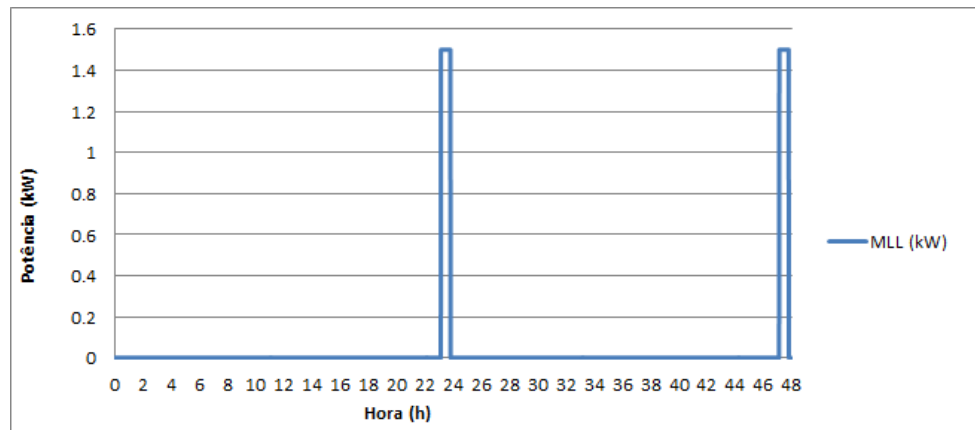


Figura C.4: Máquina Lavar Loiça

### C.1.4 Máquina de Secar Roupas

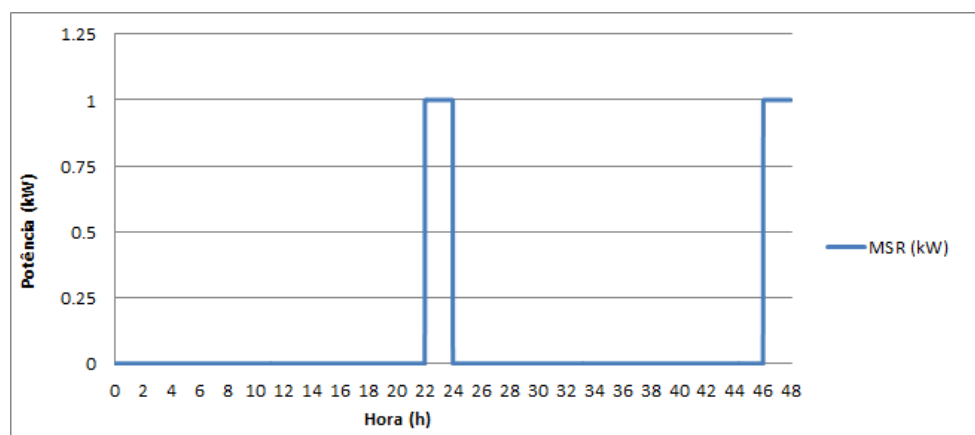


Figura C.5: Máquina Secar Roupas

### C.1.5 Fogão

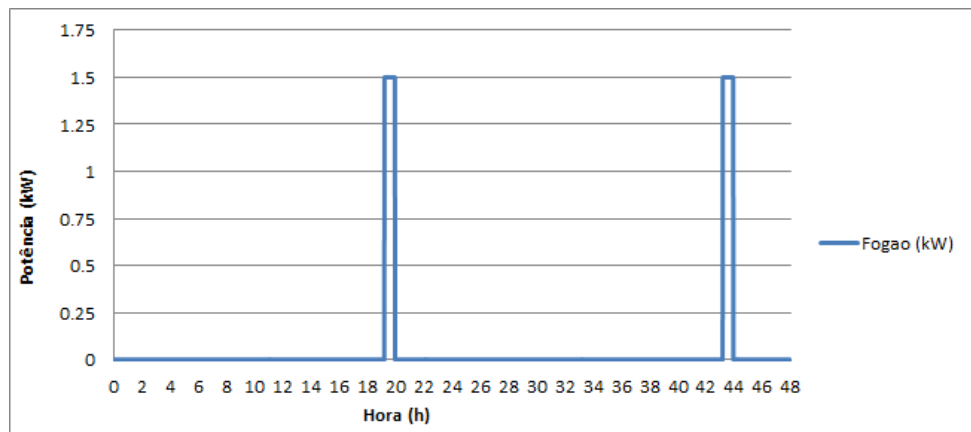


Figura C.6: Fogão

### C.1.6 Televisão

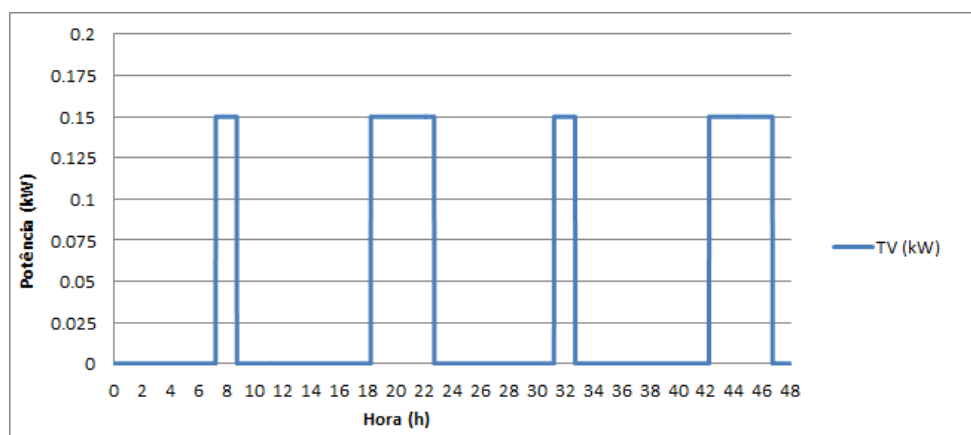


Figura C.7: Televisão

### C.1.7 Computador

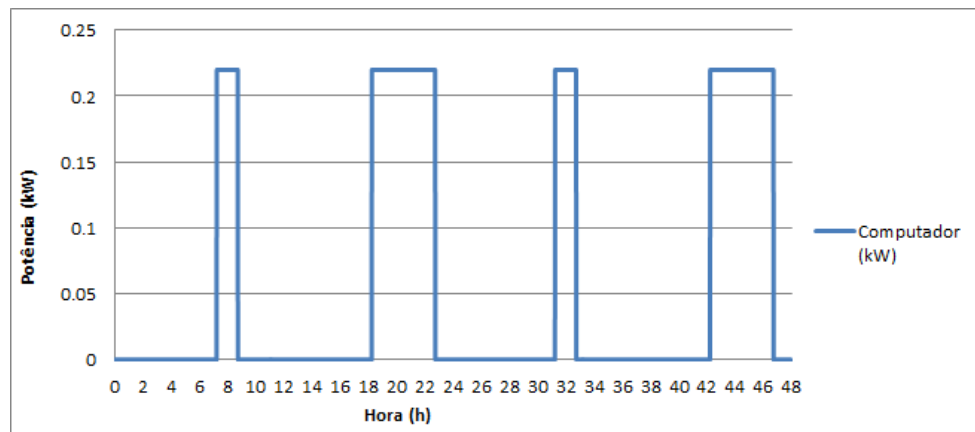


Figura C.8: Computador

### C.1.8 Outros

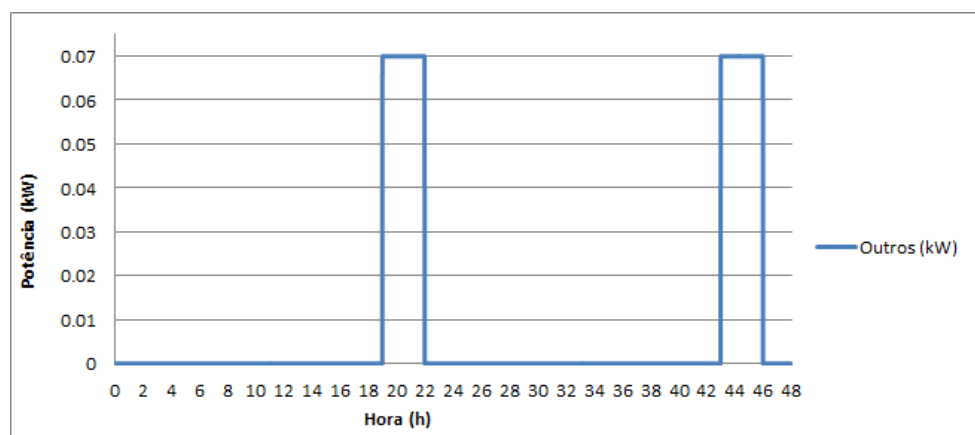


Figura C.9: Outros Electrodomésticos

### C.1.9 *Stand-By*

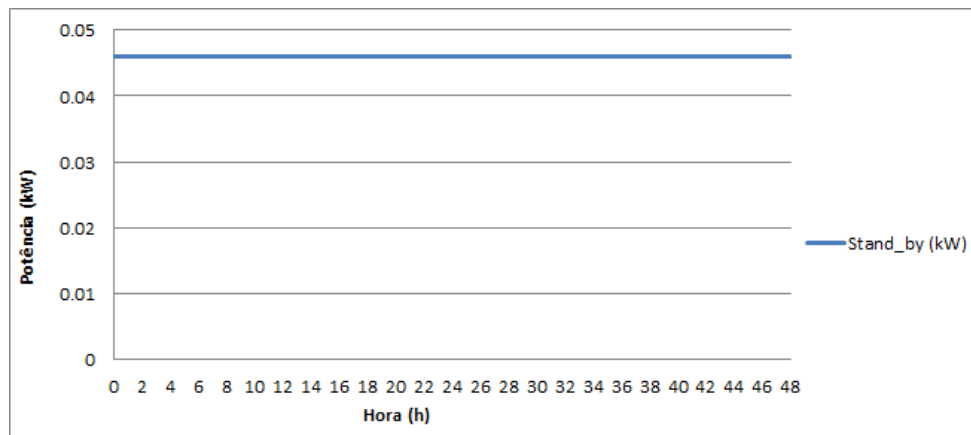


Figura C.10: *Stand-By*

# Referências

- [1] Decreto de lei. Regulamento geral das edificacoes urbanas, 2009.
- [2] Duncan S. Callaway. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy. March 2009.
- [3] Thomas Bigler, Georg Gaderer, Patrick Loschmidt, e Thilo Sauter. Smartfridge: Demand side management for the device level. 2011.
- [4] Runming Yao e Koen Steemers. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the uk. September 2004.
- [5] A. M. Ithal, H. S. Rajamani, R.A. Abd-Alhameed, e M. K. Jalboub. Statistical predictions of electric load profiles in the uk domestic buildings. December 2010.
- [6] Michael Stadler, Wolfram Krause, Michael Sonnenschein, e Ute Vogel. Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. September 2008.
- [7] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering, December 2008. Staff Report.
- [8] K. Le, T. Tran-Quoc, J.C. Sabonnadière, Ch. Kieny, e N. Hadjsaid. Peak load reduction by using air-conditioning regulators. 2008.
- [9] Cristian Perfumo, Ernesto Kofman, Julio H. Braslavsky, e John K. Ward. Load management: Model-based control of aggregate power for populations of thermostatically controlled loads. Novembro 2011.
- [10] Cristian Perfumo, Ernesto Kofman, Julio H. Braslavsky, e John K. Ward. Model-based control on populations of air conditioners: shaping aggregated power for demand side management. November 2011.
- [11] Friederich Kupzog e Charlotte Roesener. A closer look on load management. January 2007.
- [12] Liam Paull, Derek MacKay, Howard Li, e Liuchen Chang. A water heater model for increased power system efficiency. 2009.
- [13] Miguel Heleno, Manuel Matos, e J. A. Peças Lopes. Availability of thermal loads to provide reserve services.
- [14] J.A. Peças Lopes, A.G. Madureira, e C.L. Moreira. A view of microgrids. August 2012.
- [15] J.A. Peças Lopes e C.L. Moreira. Microgrids operation and control under emergency conditions.

- [16] Clark W. Gellings e William M. Smith. Integrating demand-side management into utility planning. October 1988.
- [17] R Romon e R. Wilson. Commercial demand side management using programmable logic controllers. 2004.
- [18] Jayanth Krishnnappa. Active networks: Demand side management and voltage control, 2008. A thesis submitted in partial fulfillment for the requirement of degree in Master of Science in Energy Systems and the Environment at University of Strathclyde, Glasgow.
- [19] Daniel Livengood e Richard Larson. The energy box: Locally automated optimal control of residential electricity usage.
- [20] PTDC/SEN-ENR. Configuração de um sistema de rede de distribuição inteligente de um sistema de armazenamento de energia na presença de microgeração com energias renováveis, veículos eléctricos e poligeração, 2009.
- [21] R.J. Bessa e M.A. Matos. Global against divided optimization for the participation of an ev aggregator in the day-ahead electricity market. February 2013.
- [22] OMEL. Preços de mercado, 2013. Disponível em <http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>, acedido a última vez em 14 de Junho de 2013.